

Содержание

	Введение	8
1	Стратифицированное описание литейных производств цветных металлов	13
1.1	Стратифицированное описание литейного производства свинца и цинка.	15
1.2	Стратифицированное описание литейного производства товарного магния	20
1.3	Постановка задачи	29
2	Формализованное описание процесса выбора модели промышленного робота при построении роботизированных технологических комплексов	31
2.1	Формализованная постановка задачи выбора модели серийно-выпускаемого робота для роботизации заданного технологического процесса	33
2.2	Формализованное описание рабочих пространств промышленных роботов с применением математического аппарата R - функций	38
2.3	Формализованное описание процедуры выбора модели серийно-выпускаемого ПР при роботизации технологических процессов	65
2.4	Разработка алгоритма выбора модели серийно-выпускаемого ПР при роботизации технологических процессов	68
2.5	Выбор моделей промышленных роботов для роботизации технологических операций производства товарного свинца, цинка и магния	80
3	Формализованное описание и алгоритм построения компоновочной схемы роботизированного технологического комплекса при аппроксимации её элементов прямоугольными цилиндрами	85
3.1	Формализованное описание процедуры построения компоновочной схемы роботизированного технологического комплекса	88
3.2	Построение компоновочной схемы роботизированного технологического комплекса при аппроксимации её элементов прямоугольными цилиндрами	91
3.3	Разработка алгоритма построения компоновочной схемы роботизированного технологического комплекса при аппроксимации её прямоугольными цилиндрами	95
3.4	Разработка компоновочных схем РТК производства товарного свинца, цинка и магния при аппроксимации её элементов прямоугольными цилиндрами	111
4	Математическая модель и алгоритм построения компоновочной схемы ртк при аппроксимации её элементов прямоугольными призмами	120

4.1	Формализованное описание компоновочной схемы РТК при аппроксимации её элементов прямоугольными призмами	120
4.2	Логические условия взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО	124
4.3	Разработка алгоритма построения компоновочных схем РТК при аппроксимации её элементов прямоугольными призмами	129
4.4	Разработка компоновочных схем РТК производства товарного свинца, цинка и магния при аппроксимации её элементов прямоугольными призмами	153
	Заключение	162
	Список литературы	164
	Приложение 1. – Таблица видов рабочих пространств 3-степенных промышленных роботов	172
	Приложение 2 - Блок-схемы процедур моделирования РП ПР	177
	Приложение 3 – Листинг основного модуля программы	195

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Автоматика – отрасль науки и техники, охватывающая совокупность методов и технических средств, освобождающих человека от непосредственного выполнения операций по контролю и управлению производственными процессами и техническими устройствами.

Автоматизация – замена труда человека в операциях управления работой автоматических устройств.

Автоматические устройства – технические устройства, выполняющие операции управления.

Объект управления – совокупность технических средств, выполняющих определенный технологический процесс (летательные аппараты, металлургические печи, химические и энергетические реакторы, энергосистемы и др. машины и агрегаты).

Система управления – совокупность средств управления и объекта управления.

Программные роботы – это роботы, имеющие управляемые привода во всех суставах, и их система управления легко перенастраивается на различные ручные операции.

Адаптивные роботы – это роботы которые могут самостоятельно в большей или меньшей степени ориентироваться в нестрого определенной обстановке, приспособляясь к ней.

Интеллектуальные роботы – это роботы, которые имеют более богатое очувствление, с микропроцессорной обработкой информации, распознаванием обстановки, с автоматической выработкой роботом решения о дальнейших действиях для выполнения нужных технологических операций в неопределенной или меняющейся обстановке, имеющие элементы искусственного интеллекта.

Технологические (производственные) роботы – это роботы, которые выполняют основные технологические операции.

Вспомогательные (подъемно-транспортные роботы) – это роботы, которые выполняют действия типа взять-перенести-положить.

Механизмом – называют систему тел, предназначенную для преобразования движения одних тел в требуемое движение других.

Манипулятор – это механизм, представляющий собой систему тел, которые предназначены для перемещения тела, удерживаемого в схвате манипулятора (инструмента, детали).

Звенья – это тела, образующие манипулятор.

Кинематическая пара – это механизмы образующие попарные соединения звеньев и допускающие относительные перемещения.

Кинематическая цепь – это последовательное соединение звеньев манипулятора кинематическими парами.

Число степеней подвижности – это сумма возможных координатных движений объекта манипулирования относительно опорной системы координат (стойки, основания) промышленного робота.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ТП – технологический процесс;
ТО – технологическая операция;
ЛК – литейный конвейер;
КРМ – карусельная разливочная машина;
ТР – технологический регламент;
СП – стратифицированное представление;
ПУ – производственные условия;
ПР – промышленный робот;
КС – компоновочная схема;
МР – манипуляционный робот;
РП – рабочее пространство;
ПП – пневматический привод;
Г – гидроцилиндр;
ГП – гидравлический привод;
ЭД – электрический двигатель;
ЭП – электропривод;
РТК – роботизированный технологический комплекс;
РТЯ – роботизированная технологическая ячейка;

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы. Анализ процессов литейных производств цветных металлов, таких как свинец, цинк и магний показал их достаточную сложность математического описания, схожесть процессов, но при этом и наличие значительных различий. Сложность описания данных производств обусловлена протеканием различных процессов, начиная с гидродинамики, наличием процессов теплообмена, работы карусельной разливочной машины (КРМ) или литейного конвейера (ЛК) как сложной электромеханической системы, наличия жестких требований технологического регламента (ТР) ведения процессов и выполнения операций. Для описания всего многообразия протекающих процессов предложено стратифицированное представление (СП) данных производств. Товарный свинец и цинк производится на КРМ, а товарный магний на ЛК. При этом работа КРМ носит дискретный характер, то есть металлический расплав разливается в неподвижные изложницы. А при разливке на ЛК непрерывный характер, расплав заливается в непрерывно движущиеся изложницы.

При работе КРМ выполняется технологическая операция (ТО) снятия оксидной пленки с поверхности металлического расплава залитого в неподвижные изложницы. При функционировании ЛК необходимо выполнять ТО переброса струи магниевого расплава с одной изложницы в другую и снятия оксидной пленки с поверхности залитого в движущиеся изложницы оксидной пленки. Данные ТО выполняются вручную и характеризуются выполнением однообразных, монотонных движений, протекают во вредных для здоровья работающих производственных условиях (ПУ).

Одним из путей сокращения доли ручного труда является применение для выполнения данных ТО промышленных роботов (ПР) и построения роботизированных технологических комплексов (РТК), которые состоят из отдельных роботизированных технологических ячеек (РТЯ).

Актуальность темы исследования. Для построения РТЯ и РТК производств товарного свинца, цинка и магния могут быть применены серийно выпускаемые ПР или же спроектированы и изготовлены специализированные ПР. При этом необходимо учитывать:

- неизменяемость последовательности выполнения ТП и ТО;
- неизменяемость геометрических размеров технологического оборудования;
- жесткие требования к временным интервалам выполнения ТО;
- наличие загазованности и агрессивных сред.

При построении РТЯ необходимо выполнить этапы выбора модели серийно-выпускаемой ПР, построения компоновочных схем (КС) РТК. С учетом вышеперечисленных требований и ТР ведения ТО необходимо выполнить максимальную адаптацию ПР к техническим условиям литейных производств цветных металлов.

В данной работе рассмотрены вопросы разработки моделей и алгоритмов выбора типа серийно-выпускаемого ПР с учетом жестких требований по геометрическим параметрам ПР, таким как рабочее пространство (РП). На основе выбранной модели можно построить КС РТК, где учитываются также и габаритные размеры ПР и решается задача их адаптации к геометрическим габаритам технологического оборудования. Данные задачи могут быть решены с применением подходов визуального моделирования. Однако с учетом сложности геометрической конфигурации технологического оборудования и также ограниченностью мест установки ПР применение методов визуального моделирования становится трудно применимым. Поэтому предлагается для решения данной задачи применить возможности математического аппарата R – функций.

Цель исследования. Для построения РТК производства товарного свинца, цинка и магния предлагается разработать формализованные модели и алгоритмы выбора типа серийно-выпускаемой ПР, построения КС РТК с применением математического аппарата R – функций. Для решения этих задач необходимо разработать формализованную постановку задачи выбора модели ПР, с учетом ограничений налагаемых технологическим оборудованием, требований выполнения ТО и ТР ведения данного процесса. С учетом актуальности учета геометрических параметров РТК и ПР разработать алгоритм выбора типа ПР по РП. Для разработки этого алгоритма необходимо описать РП ПР в виде логических выражений R – функций. В дальнейшем реализовать полученные логические функции в виде алгоритмов описания РП ПР. На основе типа ПР разработать формализованное описание и алгоритмы построения КС РТК с применением математического аппарата R – функций.

Методы исследования. В диссертационной работе при решении поставленных задач были использованы: методы системного анализа, основы робототехники, многоуровневых иерархических систем, математического аппарата R – функций, технологии объектно-ориентированного программирования и т.д. В качестве инструмента моделирования применен пакет прикладных программ DELPHI.

Научная новизна и основные положения выносимые на защиту. Научная новизна предлагаемого исследования заключается в модификации известных методов и разработке принципиально новых нетрадиционных подходов при разработке моделей и алгоритмов выбора типа ПР по РП, построения КС РТК. Междисциплинарный характер исследований создает определенные трудности при разработке таких алгоритмов и требует использования методов и подходов из различных областей знаний. В диссертационной работе впервые получены следующие результаты:

1. Разработанное стратифицированное описание производства товарного свинца, цинка и магния.
2. Разработанное формализованное описание и алгоритм выбора типа ПР по РП, описанный с применением логических выражений R – функций.

3. Разработанный алгоритм построения КС при аппроксимации элементов РТК прямоугольными цилиндрами и описания РП ПР с применением логических выражений R – функций.

4. Разработанный алгоритм построения КС при аппроксимации элементов РТК прямоугольными призмами и описания РП ПР с применением логических выражений R – функций.

Обоснование и достоверность результатов и выводов. Все научные положения и выводы подтверждаются результатами компьютерного моделирования, их согласованностью с экспериментальными данными и экспертными оценками.

Практическая ценность и внедрение результатов работы. Разработанное стратифицированное описание литейных производств свинца, цинка и магния могут быть применены при автоматизации и роботизации производственных процессов. Разработанные модели и алгоритмы выбора модели ПР по РП, построения КС РТК могут быть применены при построении РТК в различных отраслях промышленности. Результаты исследования, включая авторские разработки используются на лабораторных и практических занятиях по дисциплинам кафедры: «Автоматизация типовых технологических процессов и производств», «Автоматизация и управление в технических системах». Результаты работы использованы в учебно-методических комплексах дисциплин, курсах и рабочих программах по вышеперечисленным дисциплинам.

Получен акт о внедрении полученных результатов в лаборатории «Управление технологическими процессами» в Люблинском Техническом Университете, г. Люблин (Польша).

Апробация работы. Полученные результаты доложены на конференциях и обсуждены на научных семинарах кафедры «Автоматизация и управление», в Люблинском Техническом Университете, г. Люблин (Польша).

Публикации. По теме диссертации опубликовано печатные работы, из них статей рекомендованных ВАК, публикаций после участия на международных конференциях, 1 статья с импакт-фактором (Scopus).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения и четырех разделов, содержит 211 страницы, 116 рисунков и 1 таблицы, список используемых источников из 129 наименования и 3 приложений.

В первом разделе приведено стратифицированное описание литейного производства товарного свинца, цинка и магния. Выделены 4 старты, уровни описания производств свинца, цинка и магния. Это – электромеханическая страта, теплотехническая страта, гидродинамическая страта, металлургическая страта. На уровне электромеханической страты ЛК или КРМ рассматриваются как механическая система с электрическим приводом. На следующей гидродинамической страте рассмотрен процесс заливки расплава в изложницы ЛК или КРМ. Также в результате открытой струи металла её поверхность окисляется. Полученный оксид попадает в

изложницу и всплывает на поверхность расплава. На уровне теплотехнической страты рассмотрены вопросы теплообмена между чугуновой изложницей и залитым расплавом. В результате теплообмена залитый расплав охлаждается и кристаллизуется. В результате теплообмена, расплав принимает форму изложницы, далее вынимается из изложницы в виде чушки. На уровне металлургической страты рассматриваются специфические требования к ведению процесса производства товарного свинца, цинка и магния. Раздел завершается постановкой задачи диссертационной работы.

Второй раздел посвящен вопросам разработки формализованного описания и разработки алгоритма выбора модели ПР при построении РТК. Выбор модели ПР по ряду параметров задаваемый численными значениями таких как грузоподъемность, погрешность позиционирования, число степеней подвижности, вид привода, системы программного управления (СПУ) и т.п. не представляет особого труда. Наиболее трудно формализуем выбор модели ПР по РП. РП ПР может быть описана в виде визуальной модели. Однако это не всегда дает требуемый результат, поэтому предложено для описания РП ПР применить возможности математического аппарата R – функций. Учитывая особенности рассматриваемого класса ТО, при котором желательно применять ПР с небольшим числом степеней подвижности, рассмотрены манипуляторы имеющие три степени подвижности, которые могут воспроизвести заданные пространственные траектории. Анализ кинематических цепей манипуляторов с точки зрения их возможной реализации с ортогональным расположением приводов привел к получению 18 кинематических структур, которые соответствуют прямоугольной, цилиндрической и сферической системе координат. Взяв за основу эти кинематические структуры и из вид РП, получено их формализованное описание в виде логических выражений R – функций. Далее разработаны алгоритмы блок-схем формализованного описания этих РП ПР. Разработан алгоритм выбора модели ПР по РП, сущность которого заключается в поиске такого взаимного расположения РП ПР и требуемых точек позиционирования при котором они охватываются заданным видом РП ПР.

В третьем разделе рассмотрены вопросы построения КС РТК. Поставлена в общем виде постановка задачи построения КС РТК, как задачи оптимизации, с минимизацией занимаемой РТК производственной площади при ограничениях учитывающих взаимное не пересечение элементов РТК между собой и условию охвата РП ПР всех требуемых точек позиционирования с применением математического аппарата R – функций. Однако решение задачи построения РТК в такой формулировке трудно разрешимая задача. Поэтому предложено аппроксимировать элементы РТК прямоугольными цилиндрами. Тогда задача определения взаимного не пересечения элементов РТК сводится к задаче взаимного не пересечения окружностей на плоскости. Условие взаимного не пересечения окружностей взято из задачи оптимального раскроя плоского листа, которая

сформулирована в виде логического условия R – функции. РП ПР описана с применением логических выражений R – функций. Функционал оптимизации производственной площади заменен функционалом минимизации расстояний между элементами РТК. С учетом особенности рассматриваемых производств цветных металлов, неизменности расположения технологического оборудования, при построении КС РТК варьируемым параметром будет точка установки ПР. С этими допущениями задача упрощается. Это позволило разработать алгоритм построения КС РТК в виде блок-схем, которые промоделированы в среде DELPHI.

В четвертом разделе задача построения КС РТК рассмотрена для случая аппроксимации элементов РТК прямоугольными призмами. Также у учетом особенностей рассматриваемого класса технологических процессов варьируемым параметров является точка расположения ПР. В качестве критерия оптимизации выбрана минимизация расстояний между центрами многоугольников аппроксимирующих элементы РТК на плоскости. В данном случае каждый элемент РТК аппроксимируется многоугольником на плоскости. Разработана алгоритмизированная процедура задания многоугольника на плоскости в виде логического выражения R – функции. Далее получено логическое условие взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих элементы РТК. Это позволило разработать алгоритмы построения КС РТК при аппроксимации элементов РТК прямоугольными призмами. Данный алгоритм также промоделирован в программной среде DELPHI.

В заключении диссертационной работы сделаны выводы по полученным результатам разработки алгоритмов выбора модели ПР, и построения КС РТК.

Приведен список литературы, содержащий наименований. В приложениях приведены математическое описание 18 РП ПР имеющих три степени подвижности, а также блок-схемы алгоритмов формализованного описания в виде логических выражений R – функций.

1. СТРАТИФИЦИРОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Важность проблем развития науки подчеркнута Президентом Назарбаевым Н.А. в программном выступлении на расширенном заседании Правительства в Астане 6 мая 2015 года, 100 конкретных шагов по реализации пяти институциональных реформ[1]. Актуальность широкого внедрения элементов робототехники подчеркнута в послании Президента Республики Казахстан «Казахстанский путь – 2050: Единая цель, единые интересы, единое будущее» от 17 января 2014 года, где сказано: «В рамках второй и следующих пятилеток следует основать отрасли мобильных и мультимедийных, нано- и космических технологий, робототехники, генной инженерии, поиска и открытия энергии будущего» [2]. В Государственной программе индустриально-инновационного развития Республики Казахстан 2015 – 2019 годы одной из приоритетных областей определена цветная металлургия [3].

Развитие научного направления автоматике и теории управления в нашей стране началось в 60 годы прошлого столетия. В первой изданной научной монографии [4], профессор Бедельбаев А.К. рассматривает проблемы устойчивости нелинейных систем. В научных трудах профессора Ашимова А.А. и его научной школой рассмотрены методологические основы построения автоматизированных систем управления в различных отраслях промышленности [5]. В трудах профессора Айсагалиева С.А. и его учеников получили дальнейшее развитие методы исследования устойчивости регулируемых систем [6, 7]. Управление систем с дискретными регуляторами рассмотрены в трудах профессора Асаубаева К.Ш. и его учеников [8]. Вопросы идентификации сложных систем управления нашли свое развитие в трудах профессора Сыздыкова Д.Ж. и его учеников [9]. Методы управления системами с переменной конфигурацией развиты профессором Соколовой С.П. и её учениками [10]. Дальнейшее развитие получили методы исследования устойчивости робастных систем управления в трудах профессора Бейсенби М.А. и его научной школы [11]. Вопросы практической реализации систем управления в отраслях промышленности нашли свое развитие в трудах профессора Тохтабаева Г.М. и его учеников [12]. Новые подходы интеллектуального управления развиты в трудах профессора Сулейменова Б.А. и его учеников [13].

Проблема развития робототехники в нашей стране связана с именем профессора Джолдасбекова У.А. и созданной им научной школы. В рамках этой научной школы сформировались научные школы Уалиева Г.У., Байгунчекова Ж.Ж. в их научных работах рассмотрены различные аспекты роботизации технологических процессов отраслей промышленности [14, 15, 16].

Проблемы роботизации технологических процессов производства цветных металлов рассмотрены в трудах профессора Байбатшаева М.Ш. В его трудах предложены теоретические и практические подходы построения

роботизированных технологических комплексов при производстве цветных металлов [17].

Основными предпосылками расширения областей применения роботов являются [18]:

- облегчение труда рабочего с конечной целью освобождения его от неквалифицированного, монотонного, а также тяжелого и вредного труда;
- обеспечение условий безопасности труда, снижения потерь рабочего времени от производственного травматизма и профтехзаболеваний;
- повышение производительности труда и качества выпускаемой продукции за счет снижения среднего времени выполнения операций и обеспечение постоянного режима работы;
- обеспечение стабильности энергозатрат за счет круглосуточной работы технологического оборудования и т.п.

Особенно актуальна задача комплексного решения проблем автоматизации и роботизации в такой отрасли как металлургия [17]. Производство цветных металлов сопровождается наличием большого числа технологических процессов и операций имеющих монотонный, однообразный характер протекающих во вредных для здоровья работающего условиях.

Товарный свинец, цинк и магний производится в виде слитков, называемый чушками. Свинцовые и цинковые чушки производятся методом разлива жидких расплавов в изложницы карусельных разливочных машин (КРМ) [19]. Чушковый магний производится также методом разлива магниевого расплава в изложницы литейного конвейера (ЛК) [20, 21, 22]. Каждая из этих литейных машин представляет собой достаточно сложную систему, в которой производятся технологические процессы (ТП) и технологические операции (ТО) различной физической природы. Учитывая это обстоятельство описание таких систем можно вести на различных уровнях описания, так называемых стартах [23]. Стратифицированное описание позволяет с точки зрения системного подхода описать ТП, ТО различной физической природы по отдельности и установить взаимные связи между ними.

КРМ представляет собой устройство в виде круглого вращающегося стола, имеющего привод, с установленными изложницами для получения чушек из цинка и свинца. Металлический расплав, заливается порционно в изложницы, далее при вращении стола затвердевает, после чего слитки автоматически снимаются с карусели при помощи манипулятора и направляются на охлаждение.

Литейная машина представляет собой бесконечную конвейерную ленту с установленными изложницами. Конвейерная лента закреплена на приводной и натяжной барабаны. Приводной барабан вращается при помощи привода, что приводит в движение бесконечную ленту. В движущиеся с бесконечной лентой изложницы заливается магниевый расплав. По мере движения бесконечной ленты с изложницами, магниевый расплав застывает и выпадает в конце конвейерной ленты.

Рассмотрим стратифицированное описание литейных производств свинца, цинка и магния.

1.1 Стратифицированное описание литейного производства свинца и цинка.

КРМ для производства свинца, цинка (рисунок 1.1) состоит из карусели 1, вращающейся вокруг оси 2, при помощи электропривода 3. На карусели закреплены изложницы 4. Так как расплав обладает высокой текучестью, а чушки не должны иметь на поверхности раковин, трещин, посторонних включений и неровностей, внутреннюю поверхность изложницы шлифуют и боковые стенки ячеек делают наклонными. Для повышения эффективности работы в каждой изложнице предусмотрено пять ячеек, общим весом 40 кг. Для повышения скорости кристаллизации залитого металла используют оросительное охлаждение изложниц холодной водой.

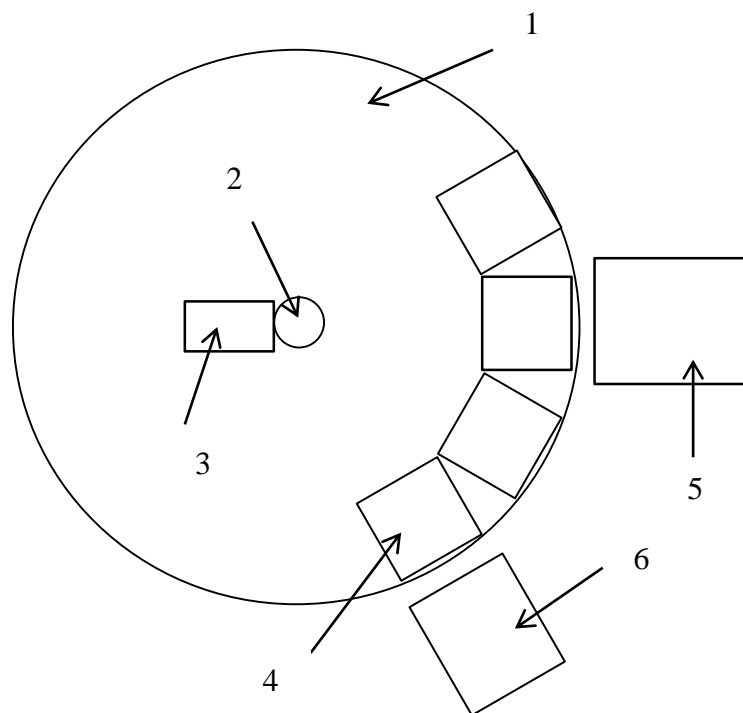


Рисунок 1.1 – Схема карусельной разливочной машины

Заполнение изложниц происходит во время остановки карусели. Свинцовый или цинковый расплав подается в изложницу из устройства подачи 5, представляющей собой наклонный ковш, в виде ложки. Ложка наклоняется в ванну печи и наполняется металлическим расплавом. Далее гидропривод ложки поднимает её, в результате наполненная ложка выливает металлический расплав в изложницу.

После заполнения изложницы металлом, её поверхность окисляется вследствие взаимодействия с окружающим воздушным пространством. Образовавшаяся оксидная пленка снимается при помощи лопатки с поверхности расплава.

Залитый в изложницу металл кристаллизуется и принимает форму изложницы. Установленные на дне изложницы толкатели выталкивают чушку. Схват манипулятора чушкоукладчика 6 захватывает чушку и устанавливает её на поворотный стол. Поворотный стол после каждой установки чушки, поворачивается на пол оборота. Этим самым чушки укладываются вперемешку, обеспечивая взаимную связку. Далее полученный таким образом пакет чушек, транспортируется в пункт дальнейшего охлаждения и складирования.

Процесс разливки металлического расплава (свинца, цинка) на карусельной разливочной машине состоит из следующих процессов:

P_1 – процесс наклона ложки и заливки металлического расплава в изложницу,

P_2 – процесс наполнения изложницы металлическим расплавом и окисление поверхностного слоя контактирующего с воздухом окружающей среды,

P_3 – процесс снятия оксидной пленки с поверхности металлического расплава,

P_4 – процесс кристаллизации металлического расплава,

P_5 – процесс охлаждения изложницы разбрызгиванием воды на нижнюю поверхность изложницы,

P_6 – процесс выемки металлической из изложницы и установки на поворотный стол.

P_7 – процесс дискретного вращения карусельной разливочной машины.

Взаимосвязь данных процессов представлена на рисунке 1.2.

Параметрами процесса являются:

$T_{\text{мр}}$ – температура залитого в ванну металлического расплава

$m_{\text{мр}}$ – масса металлического расплава находящегося в поворотной ложке,

Δt – временной интервал программного дискретного поворота карусельной разливочной машины,

$T_{\text{и}}$ – исходная температура изложницы,

$T_{\text{рз}}$ – температура металлического расплава залитого в изложницу,

$T_{\text{из}}$ – температура поверхности изложницы после заливки металлического расплава,

$m_{\text{и}}$ – масса металлического расплава после удаления оксидной пленки,

m_0 – массовый объем оксидной пленки,

$T_{\text{рк}}$ – температура металлического расплава при переходе в твердую фазу при её кристаллизации,

$T_{\text{ик}}$ – температура поверхности изложницы при переходе металлического расплава в твердую фазу,

$T_{\text{в}}$ – температура охлаждающей воды разбрызгиваемой на нижнюю поверхность изложницы,

$m_{\text{в}}$ – масса охлаждающей воды разбрызгиваемой на нижнюю поверхность изложницы,

T_{po} – температура металлической чушки полученной кристаллизацией металлического расплава,

$T_{и}$ – температура поверхности изложницы при кристаллизации металлического расплава.

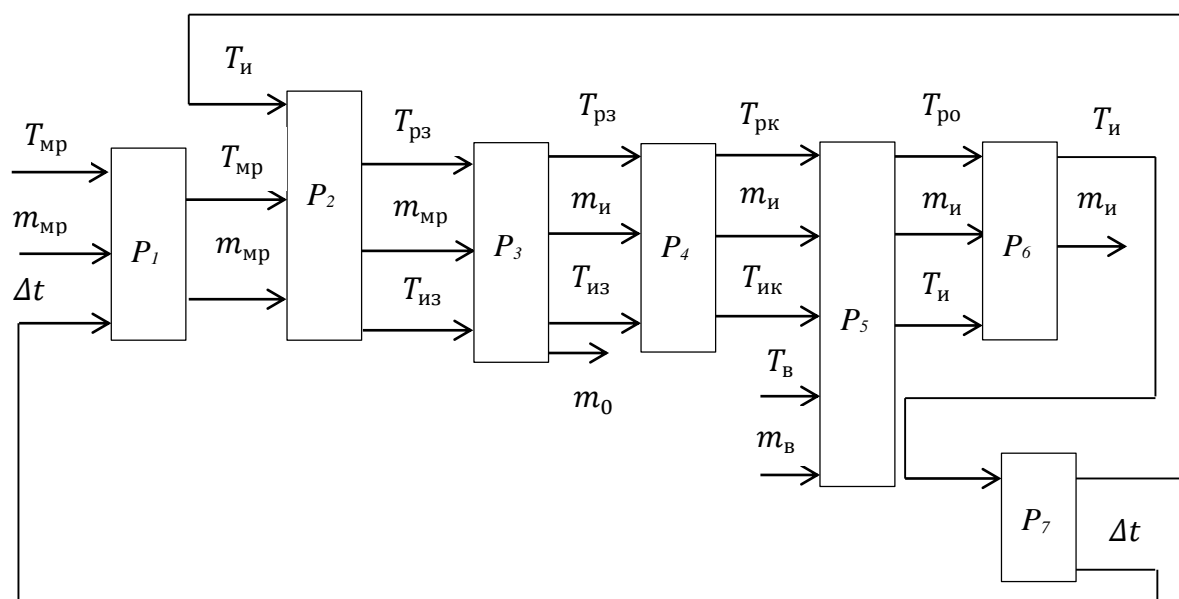


Рисунок 1.2 - Взаимосвязь элементарных процессов карусельной разливочной машины

Стратифицированное представление литейного производства свинца и цинка, позволяет выделить четыре страты, уровни описания: электромеханическую, гидродинамическую, теплотехническую и металлургическую, которые взаимосвязаны между собой.

Электромеханическая страта связана с представлением КРМ в виде механизма с приводом. В частности КРМ представляет собой карусель с закрепленными на ней изложницами (рисунок 1.1.). Карусель 1, свободно вращается вокруг оси 2. Для вращения оси 2, установлен электропривод 3. На карусели закреплены изложницы 4, в которые заливается металлический расплав. Карусель 1 вращается вокруг оси 2, в дискретные промежутки времени Δt , в эти моменты времени поворачиваются установленные на карусели изложницы. Таким образом работа КРМ носит дискретный характер. К этой же страте относится процесс снятия оксидной пленки с поверхности залитого в изложницу металлического расплава, которая будет описана ниже. Также к электромеханической страте по своему характеру выполнения, относится процесс удаления произведенной металлической чушки (свинца, цинка), из изложницы. Процесс складирования, хранения и отправки потребителям также относится к электромеханической страте, так как данная операция носит механический характер. Хотя они регламентируются на уровне металлургической страты.

Гидродинамическая страта, связана с представлением процесса разливки металлического расплава (свинца, цинка), как вязкой жидкости, в изложницы. Залитый в ванну с подогревом металлический расплав, заливается в неподвижные изложницы при помощи поворотной ложки.

На рисунке 1.3 показана фаза заполнения ложки. Ложка 2 наклонена за счет вращения вокруг оси 3 в сторону ванны с подогревом 1, которая заполнена металлическим расплавом до уровня h . Расплав также находится в полости ложки 5, то есть ложка заполнена металлическим расплавом. В позиции под ложкой находится изложница 4.

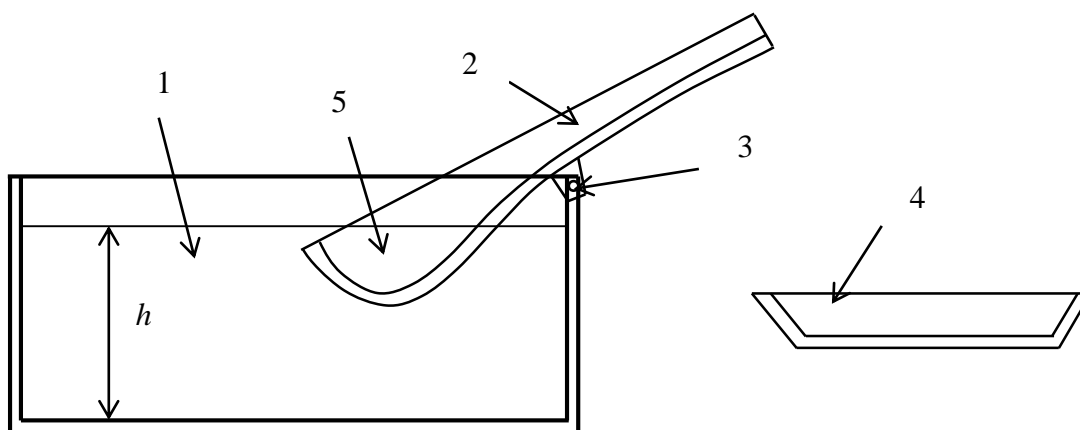


Рисунок 1.3 – Фаза наполнения ложки

Далее происходит вращение ложки вокруг оси и набранный в ложку металлический расплав стекает в изложницу (рисунок 1.4). На этой фазе происходит заполнение изложницы металлическим расплавом струей 6.

Изложница заполняется металлическим расплавом, а ложка возвращается в исходное положение. Ложка выполняет две функции, первая дозирование металла, вторая заполнения изложницы.

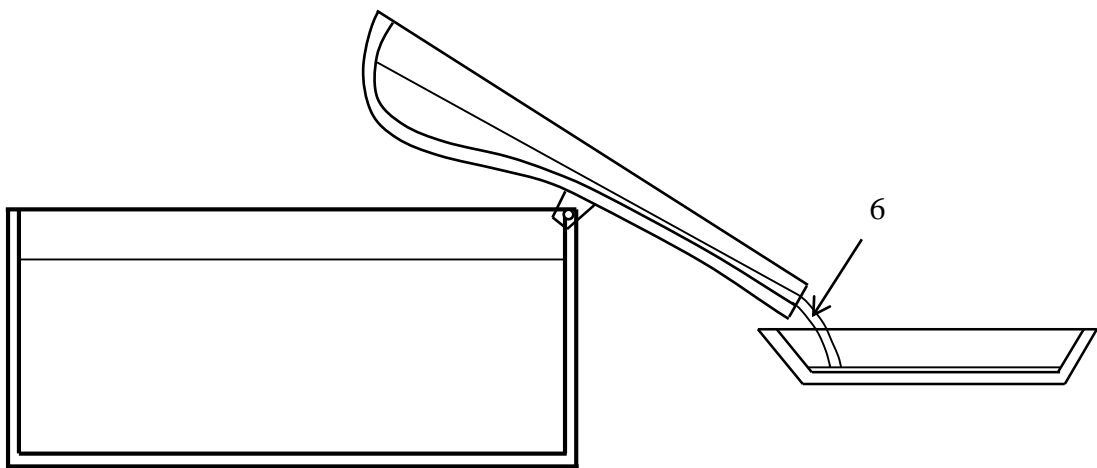


Рисунок 1.4 – Фаза наполнения изложницы

Так как разливка расплава производится в открытом пространстве, поток расплава начинает окисляться вследствие взаимодействия с воздухом. Получается, что площадь поверхности потока расплава окисляется и кристаллизуется вследствие теплообмена с окружающей средой. Образовавшаяся твердая оксидная пленка по мере разливки расплава, попадает в изложницу и всплывает на поверхность. Оксидная пленка массовым объемом m_0 собирается рабочим при помощи специального скребка. Данный процесс носит химический характер, однако она не выделена в отдельную страту, потому что связана с процессом сбора оксидной пленки с поверхности магниевого расплава и относится к электромеханической страте, так как связана с выполнением ручной операции сбора оксидной пленки с поверхности металлического расплава.

Далее рассмотрим теплотехническую страту функционирования карусельной разливочной машины. На этой страте основным является процесс теплообмена между изложницей и залитым металлическим расплавом. Заливаемый ложкой из ванны в изложницу металлический расплав температуру $T_{\text{мр}}$, в случае свинца порядка 400°C , а цинка 500°C . Температура изложница $T_{\text{и}}$ порядка 100°C . Далее происходит процесс теплообмена, между залитым металлом и боковыми стенками изложниц, также зеркала металла с окружающей средой.

При наполнении расплавом изложницы, её температура растет до значения $T_{\text{из}}$. Значение температуры расплава уменьшается до $T_{\text{рз}}$. Для дальнейшего охлаждения изложница с нижней стороны орошается водой массой $m_{\text{в}}$ и температурой $T_{\text{в}}$. В результате температура изложницы принимает значение $T_{\text{ик}}$, а температура расплава падает до величины $T_{\text{рк}}$.

В результате теплообмена залитый металлический расплав кристаллизуется и переходит в твердую фазу, принимая форму изложницы. В конце данного процесса металлическая чушка выталкивается толкателями из изложницы и устанавливается манипулятором чушкоукладчика на

поворотный стол (рисунок 1.1).

Металлургическая страта, определяет технологический регламент ведения процесса производства товарного свинца, цинка. При заливке металла в изложницу, необходимо выдерживать определенный уровень металла в изложнице, снимать с поверхности расплава, образовавшуюся оксидную пленку. Также необходимо задавать временной интервал процесса перехода, расплава в твердую фазу, за счет за счет включения привода пошагового вращения карусели Δt .

Представим процесс работы карусельной разливочной машины P_n в виде следующего отображения [23]

$$P_n: M_n \times \Omega_n \rightarrow Y_n, \quad (1.1)$$

где M_n – множество управляющих сигналов процесса P_n ,

Ω_n – множество внешних возмущений процесса P_n ,

Y_n – множество выходных сигналов процесса P_n .

Тогда элементами множеств будут [23]:

$$M_n = \{ T_{\text{мр}}, \Delta t, m_{\text{в}} \}, \quad \Omega_n = \{ m_0, T_{\text{в}} \}, \quad Y_n = \{ m_{\text{мр}}, T_{\text{и}}, T_{\text{рз}}, T_{\text{из}}, m_{\text{и}}, T_{\text{рк}}, T_{\text{ик}}, T_{\text{ро}} \}. \quad (1.2)$$

С учетом (1.2), выражение (1.1) запишется в виде:

$$P_n: \{ T_{\text{мр}}, \Delta t, m_{\text{в}} \} \times \{ m_0, T_{\text{в}} \} \rightarrow \{ m_{\text{мр}}, T_{\text{и}}, T_{\text{рз}}, T_{\text{из}}, m_{\text{и}}, T_{\text{рк}}, T_{\text{ик}}, T_{\text{ро}} \}. \quad (1.3)$$

Как видно из описания процесса производства товарных металлов (свинца, цинка) на КРМ показывает высокий уровень решения проблем автоматизации и роботизации ТП. Осталась одна технологическая операция снятия оксидной пленки с поверхности металлического расплава, которая выполняется рабочим вручную.

Данная технологическая операция характеризуется монотонностью, однообразностью выполняемых движений, выполняется во вредной работающему производственных условиях (наличие пыли, загазованности парами вредных для здоровья веществ). Одним из путей решения этой проблемы, является роботизация данной технологической операции.

1.2 Стратифицированное описание литейного производства товарного магния

Содержательно процесс литейного производства товарного магния представляет собой процесс разлива жидкого металла на ЛК, представленный на рисунке 1.3 [22]. ЛК представляет собой бесконечную цепь 1, на которой закреплены изложницы 5. Бесконечная цепь 1 закреплена на приводной 2 и натяжной 3 барабаны. В процессе вращения приводного барабана 2, бесконечная цепь 1 перемещает изложницы 5 вдоль конвейерной ленты.

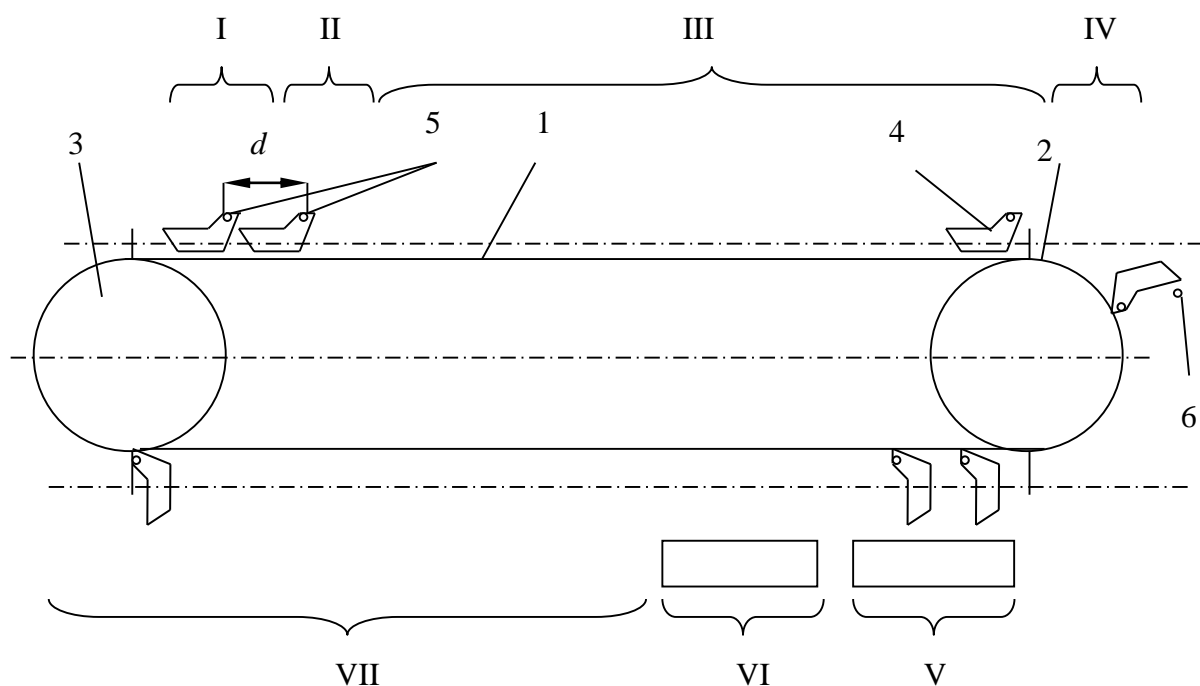


Рисунок 1.3 – Схема литейного конвейера производства товарного магния

В данном производственном процессе можно выделить следующие зоны. В зоне I в начале конвейера жидкий магний имеющий температуру порядка 710°C заливается в непрерывно движущиеся вдоль конвейерной ленты чугунные изложницы, имеющие температуру порядка 250°C . Жидкий магний разливается в изложницы из наклонного тигля или же подается из миксера при помощи электромагнитного насоса. В данной зоне оператор ЛК вручную выполняет технологическую операцию переброса струи металла между стыками, при помощи двухскатной лопатки. Залитый в чугунную изложницу металл, принимает форму изложницы. Так как процесс разливки происходит в открытом воздушном пространстве, поверхность струи металла окисляется. Образовавшаяся оксидная пленка вместе с металлическим расплавом попадает в изложницу. Оксидная пленка за счет теплообмена с окружающей средой застывает и всплывает на поверхность залитого в изложницу металла. Во II зоне другой оператор при помощи скребка, вручную собирает образовавшуюся оксидную пленку в специальную тару. Далее жидкий металл по мере движения изложницы в зоне III переходит в твердую фазу, вследствие теплообмена с изложницей. При достижении IV зоны температура поверхности изложницы поднимается до 360°C , а температура слитка магния опускается до 570°C . По мере движения конвейерной ленты, изложница достигнув приводного барабана, наклоняется и опрокидывается с соударением об упор 6. Магниевый слиток, называемый чушкой выпадает из изложницы под собственным весом. Допустимый предел изменения массы чушек, составляет 8 ± 1 килограмм. Чушки штабелируются на поддон и транспортируются в зону дальнейшего охлаждения.

После поворота изложницы вокруг барабана 2, они попадают в зону V. В

этой зоне происходит подача струи воды на поверхность изложницы. Поверхность изложницы охлаждается водой, до температуры порядка 260°C . Далее изложница охлаждается окружающей воздушной средой по мере прохождения зон VI и VII.

В зоне VI установлены газовые горелки, которые включаются в подготовительный период к работе ЛК. Поверхность непрерывно движущихся изложниц нагревается до требуемой температуры. В случае нагрева поверхности изложницы ниже требуемых температур, при заливке жидкого магния возможно выплескивание металла из изложницы. В случае перегрева поверхности изложниц заливаемый металл пережигается с образованием на нижней поверхности чушки, характерного розоватого оттенка. После выполнения подготовительного режима, газовые горелки выключаются. ЛК готов к работе.

Процесс подготовки ЛК к работе может быть разбит на следующие процессы [24, 25, 26]:

P_1 – процесс движения конвейерной ленты,

P_2 – процесс нагревания изложниц газовыми горелками,

P_3 – процесс охлаждения изложниц под воздействием температуры окружающей среды.

Взаимосвязь данных процессов представлена на рисунке 1.4.

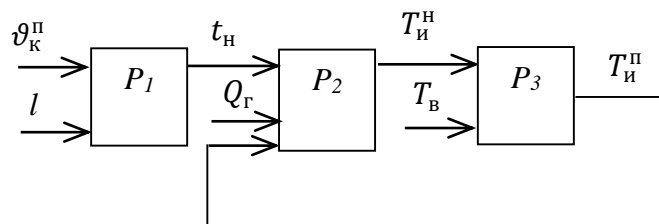


Рисунок 1.4 – Декомпозиция подготовительного режима литейного конвейера на элементарные

Входными параметрами процесса являются:

$\vartheta_k^п$ – скорость движения конвейерной ленты в подготовительном режиме,

l – длина конвейерной ленты,

Q_r – мощность газовых горелок,

$T_{в}$ – температура окружающей среды.

Выходными параметрами процесса являются:

t_n – время нагревания изложницы,

$T_{и}^н$ – температура изложницы после нагревания газовыми горелками,

$T_{и}^п$ – температура изложницы после остывания в открытом воздухе перед газовыми горелками.

При рассмотрении процесса подготовки ЛК можно выделить две взаимосвязанные друг с другом страты. На уровне электромеханической страты ЛК представляет собой бесконечную ленту с закрепленными на ней изложницами. Бесконечная лента приводится в движение приводным

барабаном. В результате изложницы перемещаются вдоль конвейерной ленты со скоростью $\vartheta_{\text{к}}^{\text{п}}$.

На уровне теплотехнической страты можно выделить два процесса, первый нагревание изложниц газовыми горелками до температуры $T_{\text{и}}^{\text{н}}$, второй процесс остывание изложниц под воздействием температуры окружающей среды до температуры $T_{\text{и}}^{\text{п}}$.

Параметрами регулирования процесса подготовки ЛК являются скорость движения конвейерной ленты $\vartheta_{\text{к}}^{\text{п}}$ и мощность газовых горелок $Q_{\text{г}}$. Регулируемым параметром является температура изложницы после остывания в открытом воздухе перед газовыми горелками $T_{\text{и}}^{\text{п}}$. Процесс нагревания изложниц продолжают до достижения температуры 260°C .

От качества выполненных подготовительных работ зависит безопасность работы рабочих и качество выпускаемой продукции. После того как конвейер готов к работе, отключаются газовые горелки и начинается рабочий цикл работы литейного конвейера.

Определим основные параметры элементарных процессов (1.1), при подготовительном режиме литейного конвейера, то есть управляющие сигналы, выходные параметры, а также контролируемые и неконтролируемые внешние возмущения.

Управляющими сигналами будут:

$\vartheta_{\text{к}}^{\text{п}}$ – скорость движения конвейерной ленты в подготовительном режиме,
 $Q_{\text{г}}$ – мощность газовых горелок.

Внешним возмущением является:

$T_{\text{в}}$ - температура окружающей среды.

Выходным сигналом будет:

$T_{\text{и}}$ – температура изложницы.

Тогда элементами множеств будут [4]:

$$M_n = \{\vartheta_{\text{к}}^{\text{п}}, Q_{\text{г}}\}, \Omega_n = \{T_{\text{в}}\}, Y_n = \{T_{\text{и}}\}. \quad (1.4)$$

С учетом (2), выражение (1) запишется в виде:

$$P_n: \{\vartheta_{\text{к}}^{\text{п}}, Q_{\text{г}}\} \times \{T_{\text{в}}\} \rightarrow \{T_{\text{и}}\}. \quad (1.5)$$

Рассмотрим рабочий режим работы ЛК для случая тигельной разливки металла. В этом случае декомпозиция процесса на элементарные процессы имеет вид представленный на рисунке 1.5 [27].

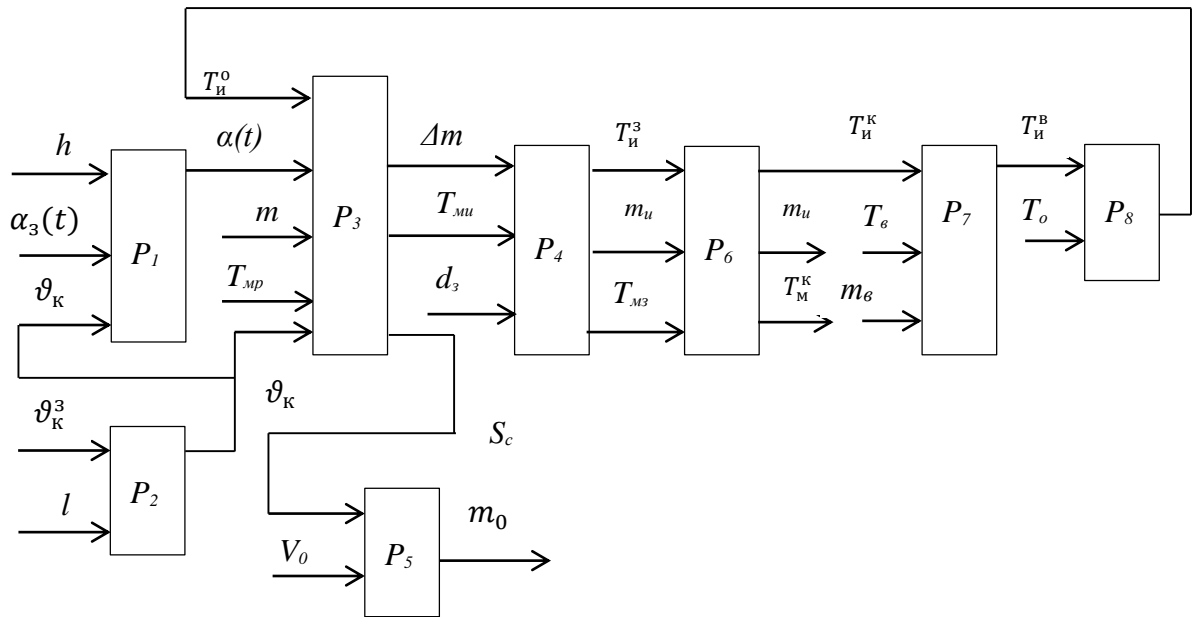


Рисунок 1.5 - Взаимосвязь элементарных процессов рабочего режима литейного конвейера

Как видно из рисунка 1.5, при рабочем режиме работы ЛК можно выделить следующие элементарные процессы:

P_1 – процесс наклона тигля и движение конвейерной ленты,

P_2 – процесс заливки металла в изложницу,

P_3 – процесс наполнения изложницы жидким металлом и окисления поверхностного слоя металла,

P_4 – процесс кристаллизации магниевого расплава,

P_5 – процесс снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава,

P_6 – процесс поворота изложницы и выпадения магниевой чушки,

P_7 – процесс охлаждения изложницы в открытом воздухе,

P_8 - процесс основного охлаждения изложницы струей водой.

Взаимосвязь данных процессов представлена на рисунке 3.

Параметрами процесса являются:

v_k^3 – заданная скорость движения конвейерной ленты в рабочем режиме,

h – уровень магниевого расплава в тигле,

l – длина конвейерной ленты,

v_k – скорость движения конвейерной ленты в рабочем режиме,

$\alpha_3(t)$ – заданное программное движение наклона стакана наклонного устройства, связанное с уровнем магниевого расплава в тигле h и скорости движения конвейерной ленты в рабочем режиме v_k ,

$\alpha(t)$ – угол наклона тигля, установленного в стакан,

m – масса магниевого расплава в тигле,

T_{mr} – температура магниевого расплава в тигле,

Δm – скорость расхода металлического расплава заливаемого из тигля в

изложницу,

T_u – температура поверхности изложницы,

T_{mi} – температура магниевого расплава залитого в изложницу,

d_z – ширина изложницы,

S_c – площадь поверхности магниевого расплава, контактирующей с окружающим воздухом,

V_0 – скорость окисления поверхности магниевого расплава,

m_0 – массовый объем оксидной пленки,

$T_{и}^3$ – температура поверхности изложницы после заливки в неё магниевого расплава,

m_u – масса залитого в изложницу магниевого расплава,

$T_{мз}$ – температура магниевого расплава после её заливки в изложницу,

$T_{и}^k$ – температура поверхности изложницы после полной кристаллизации магниевого расплава,

$T_{м}^k$ – температура магниевого расплава при полной его кристаллизации или магниевого чушки,

m_e – масса воды охлаждающая изложницу,

T_e – температура охлаждающей воды,

$T_{и}^в$ – температура поверхности изложницы после охлаждения водой,

T_o – температура окружающей среды,

$T_{и}^o$ – температура поверхности изложницы после охлаждения окружающим воздухом.

Стратифицированное представление ЛК, в рабочем режиме позволяет выделить четыре страты: электромеханическую, гидродинамическую, теплотехническую и металлургическую, которые взаимосвязаны между собой [24, 27].

Электромеханическая страта связана с представлением ЛК в виде механизма с приводом. В частности ЛК представляет собой бесконечную ленту с закрепленными на ней изложницами. Бесконечная лента представляет собой цепную передачу, имеющую приводной 2 и натяжной 3 барабаны (рисунок 1.3). Бесконечная лента имеет длину l , вдоль которой движутся изложницы со скоростью v_k . Заданная скорость конвейера v_k^3 задается на устройство управления приводом приводного барабана 2 ЛК (рисунок 1.3). Также к электромеханической страте относится процесс удаления произведенной магниевого чушки, из изложницы. Процесс складирования, хранения и отправки потребителям также относится к электромеханической страте.

Гидродинамическая страта, связана с представлением процесса разлива магниевого расплава, как вязкой жидкости, в изложницы. При разливе магния из печи непрерывного рафинирования жидкий металл транспортируется по трубопроводу с помощью электромагнитного насоса. Так называемый МГД привод может быть применен для транспортировки жидкого магния. При тигельной разливке, магниевый расплав разливается в изложницы из наклонного тигля. В тигель залит магниевый расплав

объемной массой m , до уровня h . Далее тигель устанавливается в стакан наклонного устройства, который осуществляет медленный наклон тигля, вследствие которого магниевый расплав заливается в изложницу через носок тигля со скоростью расхода Δm . Хотя уровень магниевого расплава h и масса m известны, однако количество твердых нерастворимых примесей осажденных на дне тигля и всплывших на поверхность расплава, всегда будет различными. Поэтому количество магниевого расплава разливаемого в изложницы всегда будет различным. По этой причине эти две величины по отношению к количеству разлитого магниевого расплава будут случайными величинами.

Разливка магниевого расплава осуществляется в движущиеся изложницы, поэтому необходимо осуществлять переброс потока расплава из одной изложницы в другую. Эта операция выполняется вручную с помощью двухскатной лопатки. Этим самым осуществляется дозирование магниевого расплава залитого в данную изложницу, массовый объем которой составляет m_u .

Так как разливка магниевого расплава производится в открытом пространстве, поток расплава начинает окисляться вследствие взаимодействия с воздухом. Получается, что площадь поверхности потока магниевого расплава окисляется и кристаллизуется вследствие теплообмена с окружающей средой. Образовавшаяся твердая оксидная пленка по мере разливки магниевого расплава, попадает в изложницу и всплывает на поверхность залитого металла. Данная оксидная пленка массовым объемом m_0 собирается рабочим при помощи специального скребка. Данный процесс носит химический характер, однако она не выделена в отдельную страту, потому что связана с процессом сбора оксидной пленки с поверхности магниевого расплава.

Далее рассматривается теплотехническая страта функционирования ЛК. На этой страте можно выделить два процесса, предварительный нагрев изложниц и непосредственно рабочий режим производства товарного магния.

Первый, подготовка ЛК, который заключается в предварительном нагреве изложниц до требуемой температуры T_u . Для нагрева изложниц используются газовые горелки, которые имеют мощность Q_r . Нагрев газовыми горелками движущихся изложниц со скоростью v_k^p , имеющих длину l . Газовые горелки установлены в зоне VI (рисунок 1.3), по этой причине при конце данного участка изложницы нагретые до температуры T_u^h при дальнейшем движении изложниц охлаждаются за счет теплообмена с окружающим воздухом до температуры T_u^h . Этот тепловой процесс нагрева и охлаждения, периодически повторяясь, производится до повышения температуры изложниц до 260°C .

Второй тепловой процесс заключается в теплообмене между изложницей и залитым магниевым расплавом. Залитый в изложницу магниевый расплав имеет температуру $T_{мз}$, температура изложница T_u порядка 260°C . Далее

происходит процесс теплообмена, между залитым металлом и боковыми стенками изложниц, также зеркала металла с окружающей средой. Температура изложницы в момент начала заливки магниевого расплава равна $T_{и}^3$, а температура магниевого расплава равна $T_{ми}$. При наполнении изложницы её температура растёт до $T_{и}^3$, а температура магниевого расплава падает до $T_{мз}$. По мере движения конвейерной ленты температура изложницы повышается до $T_{и}^к$, а температура магниевого расплава падает до величины $T_{м}^к$. При достижении упора б (рисунок 1), в результате процесса теплообмена залитый магниевый расплав переходит в твердую фазу и принимает форму изложницы. В конце данного процесса металлическая чушка выпадает из изложницы.

Нагретая до температуры $T_{и}^к$ изложница по мере движения конвейерной ленты попадает в зону V (рисунок 1.3), в которой поверхность изложниц охлаждается потоком воды с температурой $T_{в}$. После прохождения зоны V температура изложниц падает до величины $T_{и}^в$. Далее изложница охлаждается температурой окружающего воздуха $T_{о}$ до величины $T_{и}^о$ равной порядка 260°C . И тепловой процесс повторяется снова. 260°C .

Металлургическая страта, определяет технологический регламент ведения процесса производства товарного магния. При заливке металла в изложницу, необходимо выдерживать определенный уровень металла в изложнице, снимать с поверхности магниевого расплава, образовавшуюся оксидную пленку. В подготовительный период необходимо прогреть изложницы до заданной температуры. Далее поддерживать эту температуру изложницы при ее охлаждении водой. Также необходимо задавать временной интервал процесса перехода магниевого расплава в твердую фазу, за счет скорости вращения конвейерной ленты.

Управление литейным производством товарного магния в подготовительном и рабочем режимах отличается друг от друга. В подготовительном режиме производится нагрев движущихся изложниц газовыми горелками до требуемой температуры, порядка 260°C . В рабочем режиме газовые горелки отключаются, и наоборот производится охлаждение водой, нагретых изложниц, за счет теплообмена с залитым магниевым расплавом.

Определим основные параметры элементарных процессов (1.1), при рабочем режиме ЛК, то есть управляющие сигналы, выходные параметры, а также контролируемые и неконтролируемые внешние возмущения.

Управляющими сигналами будут:

$\alpha_3(t)$ – заданное программное движение наклона тигля,

ϑ_k^3 – заданная скорость движения конвейерной ленты в рабочем режиме,

$m_в$ – масса воды охлаждающая изложницу,

Выходными параметрами элементарных процессов будут:

$T_{и}$ – температура изложницы,

$T_{м}$ – температура металла в изложнице

$m_{и}$ – масса залитого в изложницу металла,

m_0 – массовый объем образовавшейся оксидной пленки в изложнице.

Внешними возмущениями являются:

T_o – температура окружающей среды,

$T_в$ – температура охлаждающей воды,

T_m – температура металла в тигле,

h – уровень металла в тигле,

m – масса магниевого расплава залитого в тигель,

S_c – площадь поверхности магниевого расплава, контактирующей с окружающим воздухом.

Тогда элементами множеств будут [27]:

$$M_p = \{\alpha_3(t), \vartheta_K^3, m_в\}, \Omega_p = \{T_o, T_в, T_m, h, m\}, Y_p = \{T_u, T_m, m_u, m_0\}. \quad (1.6)$$

С учетом (5), выражение (4) запишется в виде:

$$P_p: \{\alpha_3(t), \vartheta_K^3, m_в\} \times \{T_o, T_в, T_m, h, m\} \rightarrow \{T_u, T_m, m_u, m_0\}. \quad (1.7)$$

Полученные выражения (1.3) и (1.6), показывающие взаимосвязи элементарных процессов и их параметров при производстве товарного магния в подготовительном и рабочем режимах показывают сложность формализованного описания данных производственных процессов.

Как видно из стратифицированного представления технологии производства товарного магния необходимо выполнение ряда условий, которые определяются на уровне металлургической страты. Обеспечение плавного движения конвейерной ленты, плавный наклон тигля не представляет трудной задачи.

Важное значение имеет поддержание требуемого температурного режима производства товарного магния. В случае температуры изложницы ниже требуемой, может произойти выплескивание жидкого металла из изложницы. Если же температура изложницы будет выше установленной, пригорает нижняя часть магниевого чушки, появляется сиреневый налет. Это чушка отбраковывается. Поэтому актуальна задача поддержания температурных режимов в процессе разлива магния. Для решения этой проблемы необходимо разработать устройство для измерения температуры движущихся изложниц. На основе этого устройства можно разработать систему автоматического регулирования температуры изложниц конвейера до необходимой температуры на стадии подготовки конвейера к работе.

Следующей достаточно трудной проблемой является решение проблемы переброса потока магниевого расплава между стыками изложниц. Для решения этой проблемы предлагается применить возможности промышленной робототехники. Предлагается разработать робототехническое устройство позволяющее решить данную проблему.

Одной из сложнейших проблем является проблема снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава. Задача усложняется за счет того, что необходимо снимать оксидную пленку с поверхности магниевого расплава залитого в движущуюся изложницу. Для решения этой задачи также предлагается применить возможности промышленных роботов.

Применение промышленных роботов для решения проблем

производства товарного магния, требует встраивания промышленных роботов в заданную технологическую линию. Для решения данной задачи необходимо разработать алгоритмы выбора модели серийно-выпускаемого промышленного робота, который по своим параметрам удовлетворял требованиям данного производственного процесса. На основе выбранной модели далее необходимо разработать компоновочную схему роботизированного комплекса.

1.3 Постановка задачи

Как видно из описания производства товарного свинца, цинка и магния можно сделать следующие выводы:

- процесс производства товарного свинца и цинка носит дискретно-непрерывный характер,

- процесс производства товарного магния носит непрерывный характер, с выполнением дискретных операций переброса струи металла между стыками изложниц и снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава,

- в процессе производства имеются ТО снятия оксидной пленки и переброса струи металла между стыками изложниц являющихся объектами роботизации.

Актуальность проблемы роботизации вышеперечисленных ТО актуализируется вредными для здоровья производственными условиями:

- однообразность и монотонность ручных операций, повышенная температура,

- наличием производственной пыли,

- загазованности парами кислот, в случае производства цинка серной кислоты, в случае производства магния хлорной кислоты,

- наличием вредных для здоровья паров свинца, в случае производства товарного свинца.

Для решения проблемы роботизации ТО производства свинца, цинка и магния необходимо учитывать невозможность внесения изменений в технологию производства. По этой причине необходимо максимально адаптировать промышленные роботы к условиям данного производства. Особенно актуальна привязка промышленных роботов по геометрическим параметрам, габаритам, рабочим пространствам.

Проблему роботизации в данном случае можно решить двумя способами:

- проектированием специализированных промышленных роботов,

- применением серийно-выпускаемых промышленных роботов.

В обоих случаях необходимо согласовать геометрических параметров промышленного робота с геометрическими параметрами литейных машин. Поэтому в работе предлагается разработка:

- алгоритмов выбора моделей серийно-выпускаемых промышленных роботов с учетом геометрических параметров для роботизации процессов

переброса струи металла и снятия оксидных пленок с поверхности металлических расплавов,

- алгоритмов построения компоновочных схем роботизированных технологических комплексов производства товарного свинца, цинка и магния.

2. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫБОРА МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА ПРИ ПОСТРОЕНИИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В общем случае задача построения РТК заключается в выполнении ряда этапов [18, 29]: предпроектные исследования, техническое предложение, техническое задание, эскизный проект, техно-рабочий проект. Среди этих процедур наиболее наукоемкой является этап предпроектных исследований. При выполнении этой процедуры выполняются исследования по выбору структуры, состава, основных характеристик и свойств разрабатываемого комплекса. Допущенные ошибки на этом этапе будут присутствовать на всех последующих этапах. Это приводит к необходимости неоднократного повторения всех этапов проектирования для уточнения принятых решений.

Качество выполнения этапа предпроектных исследований предопределяет работоспособность, качественные характеристики построенного варианта РТК [18, 29, 30]. На этом этапе осуществляется анализ технологической цепочки с целью выявления объектов роботизации, исследуются альтернативные варианты реализации РТК, производится предварительный анализ разработанных вариантов с целью выбора наиболее приемлемых решений для выдачи технических предложений [31, 32].

Выбор объектов роботизации производится на основе анализа ТП их разбиения на отдельные ТО и выявления среди них объектов роботизации [33]. После выбора объектов роботизации производится их анализ и разработка технических предложений по роботизации каждой рассматриваемой операции. На этом этапе широко применяются методы моделирования РТК с целью качественной оценки того или иного технического предложения [30, 31, 34].

При разработке модели функционирования варианта РТК требуется определить количественный состав оборудования, выбрать технологическое, вспомогательное оборудование, модель ПР [31]. Выбор количества единиц и моделей технологического и вспомогательного оборудования производится на основе знания особенностей роботизируемого ТП и в каждом конкретном случае носит индивидуальный характер [18, 35, 36]. Выбор моделей робота осуществляется на основе анализа свойств и параметров роботизируемой ТО и заключается в определении соответствия этих параметров характеристикам ПР [37].

С учетом особенностей рассматриваемых ТП производства товарного свинца, цинка и магния применение ПР требует его встраивание в действующее технологическое оборудование [37].

На основе полученных результатов производится планирование операций в РТК. Для эффективного выполнения всех требований технологии производства предлагается интегрировать стадии планирования операций в единую систему [38]. В общем случае выбор модели ПР можно проводить с применением разработанных баз данных серийно-выпускаемых роботов [39, 40], в которых информация о параметрах роботов хранится в виде табличной

модели.

Для организации процедуры выбора необходимо характеристики элементов РТК разделить на 2 основные группы: 1) определяющие механическую часть, то есть манипулятор (геометрические параметры, зона обслуживания), 2) определяющие систему программного управления (СПУ) и привода степеней подвижности (скорость, ускорение, погрешность позиционирования, повторяемость, возможности СПУ). Работоспособность РТК определяется суммарным влиянием этих факторов [41].

В частности в разработанной базе данных [39], содержится информация о характеристиках 820 моделей ПР, выпускаемых 170 фирмами изготовителями роботов и робототехнических систем. Однако следует отметить, что при выборе модели робота, необходимо учитывать особенности роботизируемых ТО, так как от правильного выбора модели робота зависят технические характеристики РТК. В частности с учетом особенностей технологии производства алюминиевых испарителей разработана экспертная система для выбора ПР, учитывающая особенности рассматриваемой технологии [42].

Для проверки корректности построенного варианта РТК применяются методы имитационного моделирования [30, 32, 43]. Имитационное моделирование функционирования РТК можно проводить на основе аналитических и графических методов [44].

Методы аналитического моделирования функционирования РТК основаны на графовых моделях [31, 34], с применением которых моделировать материальные потоки, и на представлении элементов РТК в терминах Денавита – Хартенберга [45], для описания геометрических и кинематических параметров сложной системы многих тел с использованием однородных координат проективного пространства [46]. Результаты аналитического моделирования являются более точными, но не наглядными, как в случае графического моделирования [44, 45].

Системы графического моделирования в последнее время получили широкое при моделировании функционирования РТК, движений робота, в среде с препятствиями, с возможностями коррекции работы элементов РТК [47 - 51].

Широко известны и используются системы графического моделирования РТК, такие как АПРОГРАФ, GEOMAP, ROBEX, RAPT, GRASP, CATIA, AUTOPASS, PLACE, AL, AML, ROBOCAD, RPL, RDL, Roboplan [44, 52 - 66]. Для хранения данных в этих системах используется удобный формат в виде представления Денавита – Хартенберга. Анализ функционирования РТК производится по результатам графического моделирования. Вывод о работоспособности построенного варианта РТК делается разработчиком.

При роботизации ТО производства товарного свинца, цинка и магния, одной из задач является задача выбора модели промышленного робота (ПР). Эта задача может быть решена двумя путями. Первый путь предполагает проектирование и изготовление новой модели робота, полностью удовлетворяющим требованиям роботизируемого производственного

процесса. Этот путь наиболее эффективен, но и наиболее продолжительный во времени и приводит к достаточно большим финансовым затратам. Второй путь связан с применением для роботизации заданного производственного процесса серийно-выпускаемых роботов. Этот путь менее продолжителен и по сравнению первым путем, требует меньших финансовых затрат [28].

При роботизации производственного процесса вторым путем требуется осуществить выбор модели серийно-выпускаемого робота, который по своим техническим характеристикам по сравнению с другими, удовлетворяет требованиям роботизируемой операции. Эта процедура связана с анализом большого числа моделей и параметров серийно-выпускаемых роботов. Поэтому актуальна проблема разработки формализованного алгоритма выбора моделей серийно-выпускаемых роботов при роботизации производственных процессов [18].

2.1 Формализованная постановка задачи выбора модели серийно-выпускаемого робота для роботизации заданного технологического процесса

В общем случае, роботизированный технологический комплекс (РТК), имеет в своем составе: промышленный робот (ПР) со специальной оснасткой, технологическое и вспомогательное оборудования. Для формализованного описания РТК применим математический аппарат R-функций [67, 68]. Применение математического аппарата R - функций для получения математической модели в виде логических выражений, позволяет использовать все преимущества алгебры логики в классическом математическом анализе, так как, в составе РТК имеются как дискретные, так и непрерывные элементы.

Математическую модель РТК представим в виде следующего логического выражения [69]:

$$M(g_i)L^R T(p_j)L^R V(v_k) = 1, \\ g_i^H \leq g_i \leq g_i^B, p_j^H \leq p_j \leq p_j^B, v_k^H \leq v_k \leq v_k^B, \quad (2.1) \\ i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, s,$$

где $M(g_i)$ – логическое выражение, описывающее ПР,

$g_i - i$ – тый параметр ПР,

g_i^H, g_i^B – нижний, верхний пределы изменения параметра g_i ,

n – количество параметров, описывающих ПР,

$T(p_j)$ – логическое выражение, описывающее технологическое оборудование,

$p_j - j$ – тый параметр технологического оборудования,

p_j^H, p_j^B – нижний, верхний пределы изменения параметра p_j ,

m – количество параметров, характеризующих технологическое оборудование,

$V(v_k)$ – логическое выражение, описывающее вспомогательное оборудование,

v_k – k – тый параметр вспомогательного оборудования,
 v_k^H, v_k^B – нижний, верхний пределы изменения параметра v_k ,
 s – количество параметров характеризующих вспомогательное оборудование,
 L^R – знаки логических операций: R – конъюнкции, \vee – дизъюнкции, \bar{R} – отрицания.

Выражение (2.1) показывает, то что, если ПР, технологическое и вспомогательное оборудование своими параметрами g_i, p_j, v_k удовлетворяют данному логическому выражению (логическое выражение истинно), то построенный вариант РТК может функционировать с определенным качеством (производительность, надежность, и т.п.), в противном случае (логическое выражение ложно), построенный вариант РТК неработоспособен.

Учитывая множество практических реализаций логического выражения (2.1), введем критерий качества функционирования РТК следующего вида:

$$F(g_i, p_j, v_k) \rightarrow \min(\max), \quad (2.2)$$

и задачу построения РТК представим в виде решения задачи оптимизации, с критерием качества (2.2) определяющий особенности роботизируемой технологической операции, при этом в него могут входить не все параметры g_i, p_j, v_k , описывающие ПР технологическое и вспомогательное оборудования, при ограничении вида (2.1). В качестве критерия качества (2.2) можно выбрать экономические показатели, например стоимость РТК, себестоимость готовой продукции, или же технические параметры, такие как производительность, надежность РТК.

В составе РТК, ПР может выполнять операцию обслуживания станков типа установки и съема детали, или же основную технологическую операцию типа сварки, сборки, зачистки и т.п. Вопросы выбора и разработки основного технологического или вспомогательного оборудования представляет собой отдельную задачу и в статье не рассматриваются, в большинстве случаев оно выбирается или же проектируется на основе известных методов [18, 70].

Пусть тип основного технологического и вспомогательного оборудования известен, необходимо спроектировать или же выбрать тип серийно-выпускаемого ПР для роботизации данного производственного процесса. На первом этапе выполняется процедура выбора ПР из числа серийно-выпускаемых роботов. В случае если невозможно роботизировать данную операцию с применением серийно-выпускаемых ПР, ставится задача проектирования и изготовления нового ПР. Проектирование и изготовление нового ПР достаточно сложная и дорогостоящая процедура. Но в этом случае возможен полный учет всех особенностей роботизируемой операции [29].

Будем считать, что основное технологическое и вспомогательное оборудования составляют неизменяемую часть РТК. Изменяемой частью РТК является тип ПР. Тогда для построения РТК необходимо выбрать модель серийно-выпускаемого ПР. Процедуру выбора модели ПР можно представить в виде целенаправленного отбора серийно-выпускаемых

моделей, параметры g_i которого удовлетворяют логическому выражению (2.1), при постоянных значениях параметров p_j, v_k . Из числа отобранных моделей далее выбирается наиболее приемлемая модель ПР, которая своими параметрами g_i доставляет минимум (максимум) критерию качества вида (2.2).

Структурная схема ПР представлена на рисунке 2.1. Как видно из структурной схемы, ПР состоит из трех основных частей: манипулятора, системы программного управления, приводов степеней подвижности.

Манипулятор представляет собой разомкнутую кинематическую цепь, имеющую n -степеней подвижности, каждая степень подвижности с приводом обычно реализуется в виде механизма 5-го класса и закреплена к неподвижному основанию. Положение каждой степени подвижности однозначно определяется значением обобщенной координаты $q_i, (i=1,2,\dots,n)$. Система программного управления предназначена для задания значений обобщенных координат, в некоторых случаях значений скоростей изменения значений обобщенных координат, для выполнения движения схватом или рабочим органом вдоль заданных траекторий или позиционирования в заданных точках [71, 72].

Для организации процедуры выбора модели ПР необходимо конкретизировать выражение (1). Выбор модели ПР по ряду параметров не представляет большого труда и производится простейшим сравнением значений параметров робота и технологической операции.

При роботизации технологических операций необходимо выбирать модель робота по требуемой грузоподъемности и погрешности позиционирования. Если не выполняются требования по указанным параметрам, то данная модель робота в дальнейшем не рассматривается.

Если выполняется условие:

$$M_{\text{пр}}^i - M_{\text{то}} \geq 0, \quad (2.3)$$

где $M_{\text{пр}}^i$ – грузоподъемность i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

$M_{\text{то}}$ – требуемая грузоподъемность для выполнения рассматриваемой технологической операции, то заданный робот удовлетворяет условиям технологического процесса по грузоподъемности.

Если выполняется условие:

$$d_{\text{то}} - d_{\text{пр}}^i \geq 0, \quad (2.4)$$

где $d_{\text{пр}}^i$ – погрешность позиционирования i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

$d_{\text{то}}$ – требуемая погрешность позиционирования для выполнения рассматриваемой технологической операции, то данный робот удовлетворяет условиям технологического процесса по погрешности позиционирования.

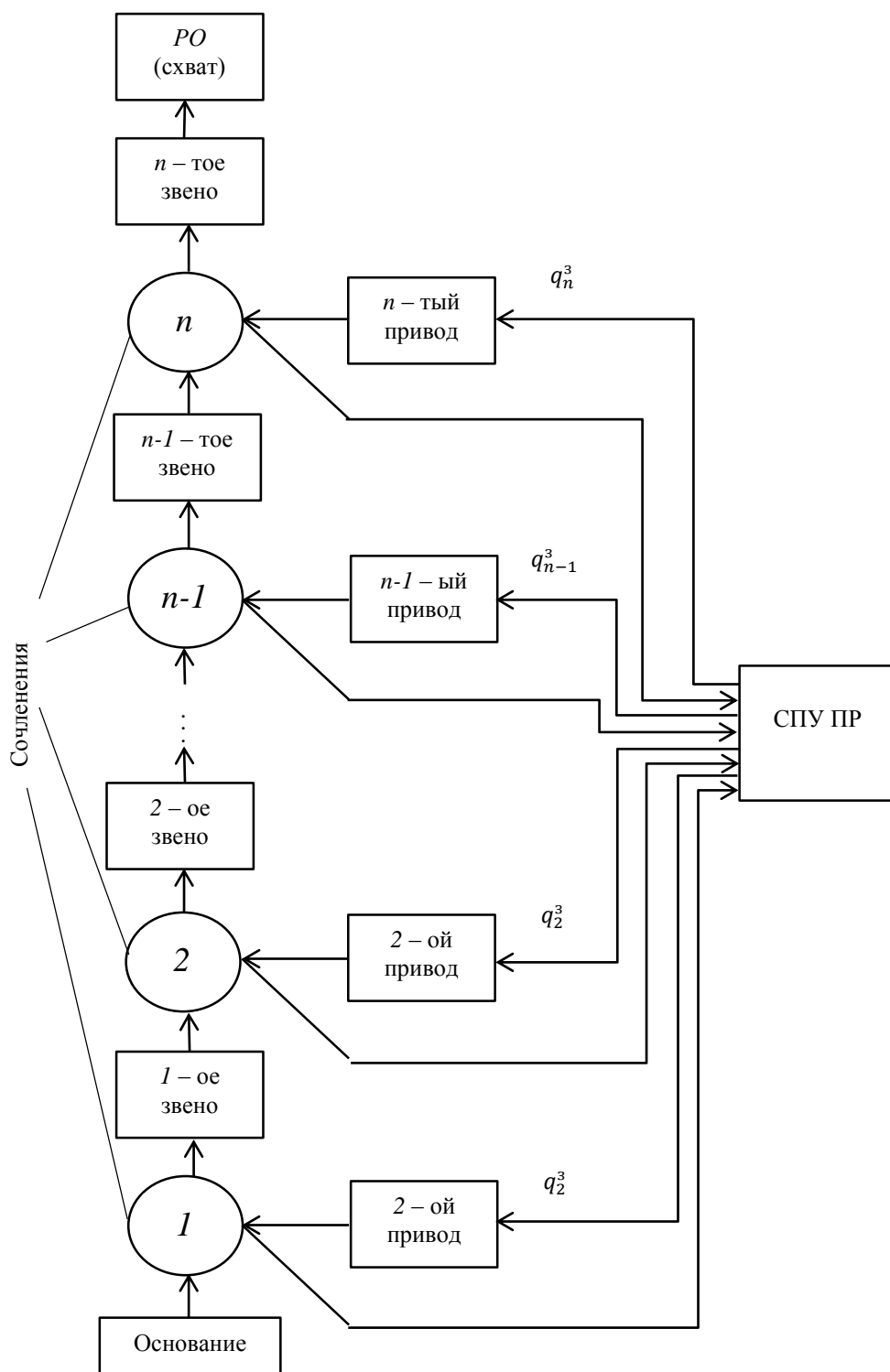


Рисунок 2.1. – Структурная схема промышленного робота

По виду привода степеней подвижности ПР можно классифицировать в виде следующего выражения [18]:

$$r_{\text{п}} = \begin{cases} 1, \text{ пневматический,} \\ 2, \text{ гидравлический,} \\ 3, \text{ электрический,} \\ 4, \text{ комбинированный.} \end{cases} \quad (2.5)$$

Следующей важной характеристикой, которую необходимо учитывать

при выборе модели робота при роботизации рассматриваемых технологических операций является область применения робота. Область применения предполагает соответствующее исполнение основных узлов робота, в зависимости от производственной среды, в которой осуществляются технологические операции. Так как производственная среда может иметь специфический характер, например наличие производственной пыли, пожарной и взрывной опасных сред, агрессивной среды и т.п. По области применения роботы можно классифицировать в виде следующего логического выражения [18]:

$$r_{\text{и}} = \begin{cases} 1, \text{ механическая обработка,} \\ 2, \text{ кузнечно – пресовое,} \\ 3, \text{ сварочное,} \\ 4, \text{ термообработка,} \\ 5, \text{ нанесение покрытий,} \\ 6, \text{ автоматический контроль,} \\ 7, \text{ сборка,} \\ 8, \text{ транспортно-складские,} \\ 9, \text{ прочие.} \end{cases} \quad (2.6)$$

Тип системы программного управления ПР зададим выражением вида [18]:

$$r_{\text{у}} = \begin{cases} 1, \text{ цикловая,} \\ 2, \text{ позиционная,} \\ 3, \text{ контурная,} \\ 4, \text{ комбинированная.} \end{cases} \quad (2.7)$$

Объединяя выражения (2.3 – 2.7) получим логическое выражение, определяющее выбор модели робота по выше рассмотренным параметрам :

$$(M_{\text{ПР}}^i - M_{\text{ТО}} \geq 0) \Lambda_1(d_{\text{ТО}} - d_{\text{ПР}}^i \geq 0) \Lambda_1(r_{\text{и}} = r_{\text{и}}^i) \Lambda_1(r_{\text{п}} = r_{\text{п}}^i) \Lambda_1(r_{\text{у}} = r_{\text{у}}^i) = 1, \quad (2.8)$$

где $r_{\text{и}}$, $r_{\text{п}}$, $r_{\text{у}}$ – область применения, вид привода, системы программного управления, определяемая особенностями роботизируемой технологической операции,

$r_{\text{и}}^i$, $r_{\text{п}}^i$, $r_{\text{у}}^i$ – область применения, вид привода, системы программного управления i – той модели серийно-выпускаемого ПР.

Логическое выражение (2.8) можно усложнить за счет добавления различных параметров робота, которые задаются выражениями вида (2.3 – 2.7).

Более сложной является задача выбора моделей серийно-выпускаемых ПР по рабочим пространствам (РП), удовлетворяющим требованиям роботизируемой операции. Сложность этой задачи заключается в анализе большого многообразия РП, определяемых кинематической структурой манипулятора ПР. Данная задача в известных системах моделирования ПР решается методами визуального моделирования. Однако при сложном виде конфигурации элементов РТК, РП ПР применение методов графического

моделирования затруднено. Поэтому предлагается аналитическое решение задачи выбора РР. Для описания РП ПР применяется математический аппарат R-функций [68].

2.2 Формализованное описание рабочих пространств промышленных роботов с применением математического аппарата R - функций

В общем случае РП ПР можно описать в виде следующей логической функции [67, 68]:

$$L(D_k(x, y, z) \geq 0) = 1, \quad (2.9)$$

где $D_k(x, y, z) \geq 0$, ($k=1, 2, \dots, r$), k – та часть пространства, ограниченная элементарной поверхностью, описываемой простейшим неравенством, задающим или аппроксимирующим границу РП,

r – число элементарных поверхностей.

Логическое выражение (2.9) можно получить следующим образом:

1) выявляются элементарные поверхности, описывающие или аппроксимирующие границы РП ПР. Сюда входят также дополнительные вспомогательные поверхности, предназначенные для логического формирования функции, описывающей РП ПР. Эти поверхности можно задать элементарными неравенствами вида $D_k(x, y, z) \geq 0$;

2) составляется Булева функция, логически формирующая на основе геометрического образа РП, а также граничных и вспомогательных поверхностей:

$$D_1 L D_2 L \dots L D_n = 1, \quad (2.10)$$

где n – количество поверхностей, аппроксимирующих РП ПР,

L – знак логической операции (конъюнкции, дизъюнкции или отрицания),

D_i , ($i = 1, 2, \dots, n$) – логическая переменная, определяемая следующим выражением:

$$D_i = \begin{cases} 1, & \text{если } D_i(x, y, z) \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

3) на основе полученной Булевой функции (2.10) строится R – функция, описывающая РП ПР:

$$(D_1(x, y, z) \geq 0) L^r (D_2(x, y, z) \geq 0) L^r \dots L^r (D_n(x, y, z) \geq 0) = 1, \quad (2.11)$$

где L^r – знак логической операции R – конъюнкции, R – дизъюнкции или R – отрицания.

Таким образом, можно описать достаточно сложные виды РП ПР, как геометрических объектов в виде логического выражения (2.11). Сложность описания заключается в формировании логических выражений $D_i(x, y, z) \geq 0$, описывающих граничные поверхности.

Как показано в [68] рабочее пространство (РП) ПР зависит от вида кинематической цепи (КЦ) и пределов изменения обобщенных координат по степеням подвижности. Для роботизации технологических операций в

основном применяются ПР имеющие 3 – 4 транспортирующие степени подвижности [17].

В большинстве компоновок КЦ применяются только вращательные и прямолинейные поступательные пары [70]. Реальные конструкции манипуляторов выполняются с ортогональным расположением осей соседних кинематических пар. Для перечисления вариантов кинематических структур [73] предложен формальный язык описания КЦ ПР. Нумерацию кинематических пар в КЦ начинают с неподвижного звена манипулятора, которое входит в состав первой кинематической пары.

Для того, что бы структура КЦ была записана необходимо определить положение в пространстве центров и ориентацию осей всех кинематических пар относительно центра первой кинематической пары. Для манипуляторов с ортогональным расположением кинематических пар вводятся следующие обозначения П, В, П', В', П'', В'', где П и В – поступательная и вращательная кинематическая пара, являющаяся первой или однонаправленной с предыдущей кинематической парой, П', В' - обозначают кинематические пары, оси которых перпендикулярны оси предыдущего элемента, но параллельны оси предшествующего элемента, П'', В'' - обозначают кинематические пары, оси которых перпендикулярны к осям двух предыдущих, обязательно разнонаправленных элементов.

В работе [73] определены 18 структур КЦ, соответствующие общепринятым системам координат: прямоугольной, цилиндрической, сферической. Эти КЦ ПР сведены в таблицу Приложения 1.

В таблице приложения 1, первый столбец, соответствует номеру по порядку. Во втором столбце схематически показан вид кинематической структуры ПР. В третьем столбце приведен вид РП ПР. В четвертом столбце приведено формализованное описание РП ПР с применением математического аппарата R – функций.

Рассмотрим эти структуры КЦ ПР. Наиболее простой является структура П, П', П'', которая соответствует трём поступательным кинематическим парам. Такой структуре КЦ, соответствует структура манипулятора ПР модели «Versaweld» компании «Howker Siddeley» (Великобритания). Кинематическая структура данного ПР приведена в 1 строке Приложения 1. РП данного робота представляет собой куб сторонами равными a . Для формализованного описания РП в виде R – функции необходимо определить все граничные поверхности. Для этого геометрически построены проекции РП, которые представлены на рисунке 2.2.

Получим формализованное описание РП данной модели ПР с применением математического аппарата R – функций [69]. Для этого надо определить логические переменные задающие граничные поверхности.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное ниже плоскости, $z = \frac{3}{2}a$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{3}{2}a - z \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.12)$$

D_2 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное выше плоскости, $z = \frac{1}{2}a$:

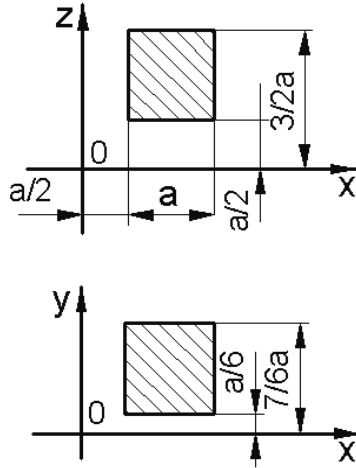


Рисунок 2.2 – Проекция РП ПР, при структуре КЦ: П, П', П''

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } z - \frac{1}{2}a \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.13)$$

D_3 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное левее плоскости, $x = \frac{3}{2}a$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{3}{2}a - x \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.14)$$

D_4 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $x = \frac{a}{2}$:

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } x - \frac{a}{2} \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.15)$$

D_5 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное левее плоскости, $y = \frac{7}{6}a$:

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{7}{6}a - y \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.16)$$

D_6 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $y = \frac{1}{6}a$:

$$D_6 = \begin{cases} 1, & \text{если } y - \frac{1}{6}a \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.17)$$

На основании логических переменных (2.12) – (2.17) задающих граничные полупространства, сформируем Булеву функцию описывающую

данный вид РП:

$$D_1 \cap D_2 \cap D_3 \cap D_4 \cap D_5 \cap D_6 = 1. \quad (2.18)$$

В полученной Булевой функции (2.18) заменим логические переменные, на непрерывные условия в виде неравенств. Также заменим логические операции конъюнкции, дизъюнкции и отрицания на их аналоги R – конъюнкции, R – дизъюнкции и R – отрицания, по основанию равной 1, которое приведено формально для определения R – функции, описывающей данный вид РП, получим:

$$\left(z - \frac{1}{2}a \geq 0\right) \cap_1 \left(\frac{3}{2}a - z \geq 0\right) \cap_1 \left(x - \frac{a}{2} \geq 0\right) \cap_1 \left(\frac{3}{2}a - x \geq 0\right) \cap_1 \left(y - \frac{1}{6}a \geq 0\right) \cap_1 \left(\frac{7}{6}a - y \geq 0\right) = 1. \quad (2.19)$$

Для разработки процедуры выбора модели ПР по РП сформируем процедуру РП-1, выполняющей процесс проверки принадлежности заданной точки траектории движения схвата РП данного ПР, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.1. Вводными данными будут координаты точек позиционирования схвата ПР, $A_j^i(x_j^i, y_j^i)$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n_i}$ j – та же точка i – того технологического или вспомогательного оборудования (ТВО).

При этом m – число единиц ТВО, n_i – число точек позиционирования, привязанных к i – тому ТВО. Далее выполняется последовательно проверка условий (2.12) – (2.17), что эквивалентно проверке логического условия в виде Булевой функции (2.18) или же в форме R – функции (2.19). Если требуемая точка позиционирования схвата принадлежит РП ПР, то выводится логическая переменная $D_i = 1$, в противном случае $D_i = 0$.

Рассмотрим ПР имеющей КЦ П, В[П'], П. Это соответствует КЦ ПР модели «Matbac RC-30» компании «Tokio Keiki» (Япония), кинематическая структура и вид РП, которой приведен во 2 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой усеченную цилиндрическую форму. Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.3.

Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $x = 0$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.20)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство ограниченное цилиндром радиуса $R = \frac{13a}{6}$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(\frac{13a}{6}\right)^2 - (x^2 + y^2) \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.21)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство цилиндра с радиусом $r = \frac{7a}{6}$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } (x^2 + y^2) - \left(\frac{7a}{6}\right)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.22)$$

D_4 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное ниже плоскости, $z = \frac{7}{6}a$:

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{7}{6}a - z \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.23)$$

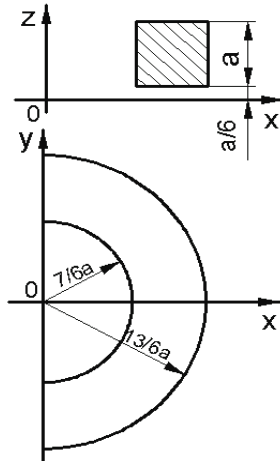


Рисунок 2.3 – Проекция РП ПР при структуре Π , $V[\Pi']$, Π

D_5 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное выше плоскости, $z = \frac{1}{6}a$:

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } z - \frac{1}{6}a \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.24)$$

Булева функция, полученная на основе (2.20) – (2.24), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$D_1 \cap D_2 \cap D_3 \cap D_4 \cap D_5 = 1. \quad (2.25)$$

На основании Булевой функции (2.25), получена соответствующая R – функция, вида:

$$(x \geq 0) \cap_1 \left(\left(\frac{13a}{6} \right)^2 - (x^2 + y^2) \geq 0 \right) \cap_1 \left((x^2 + y^2) - \left(\frac{7a}{6} \right)^2 \geq 0 \right) \cap_1 \left(\frac{7}{6}a - z \geq 0 \right) \cap_1 \left(z - \frac{1}{6}a \geq 0 \right) = 1. \quad (2.26)$$

Для реализации (2.26) разработана процедура РП – 2, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.2.

Отличие от вышеприведенной процедуры, заключается в конечном итоге в реализации логического выражения (2.26).

Рассмотрим ПР КЦ которой имеет следующую структуру Π , $V[\Pi']$, $V'[\Pi'']$. Это соответствует КЦ ПР модели «Daikabot» компании «Daido Steel» (Япония), кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 3 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой сложную

цилиндрическую форму. Проекции РП данного ПР, представлены на рисунке 2.4.

Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное ниже плоскости, $z = \frac{7}{6}a$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{7}{6}a - z \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.27)$$

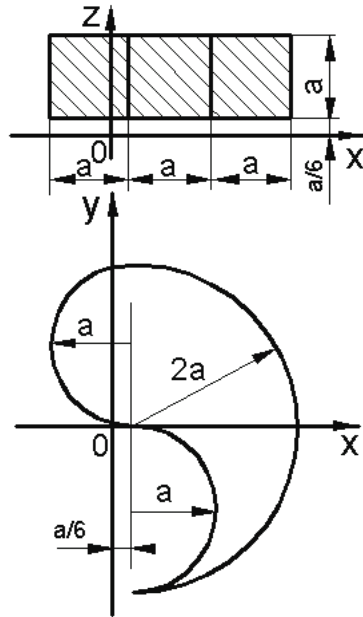


Рисунок 2.4 – Проекции РП ПР при структуре Π , $V[\Pi']$, $V'[\Pi'']$

D_2 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное выше плоскости, $z = \frac{a}{6}$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } z - \frac{a}{6} \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.28)$$

D_3 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $x = \frac{a}{6}$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } x - \frac{a}{6} \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.29)$$

D_4 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство ограниченное цилиндром радиуса $R = 2a$:

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - y^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.30)$$

D_5 – логическая переменная, задающая внешнее пространство цилиндра с радиусом $r = a$:

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 + (y + a)^2 - a^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.31)$$

D_6 – логическая переменная, задающая внешнее пространство цилиндра с радиусом $r = a$:

$$D_6 = \begin{cases} 1, & \text{если } a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - (y - a)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.32)$$

Булева функция, полученная на основе (2.27) – (2.32), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$D_1 \cap D_2 \cap ((\overline{D_3} \cap D_6) \cup (D_3 \cap D_4 \cap D_5)) = 1. \quad (2.33)$$

На основании Булевой функции (2.33), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{7}{6}a - z \geq 0\right) \cap_1 \left(z - \frac{a}{6} \geq 0\right) \cap_1 \left(\left(x - \frac{a}{6} < 0\right) \cap_1 \right. \\ & \left. \left(a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - (y - a)^2 \geq 0\right)\right) \cup_1 \left(\left(x - \frac{a}{6} \geq 0\right) \cap_1 \right. \\ & \left. \left(4a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - y^2 \geq 0\right) \cap_1 \left(\left(x - \frac{a}{6}\right)^2 + (y + a)^2 - a^2 \geq 0\right)\right) = 1 \quad . \\ & (2.34) \end{aligned}$$

Для реализации (2.34) разработана процедура РП – 3, блок-схема которой приведена в Приложении 2, на рисунке П2.3.

Отличие от вышеприведенных процедур, заключается в конечном итоге в реализации логического выражения (2.34). Так же в данном случае имеется логическая операция объединения, которая привела к появлению двух направлений, при которых выполняется условие принадлежности точки траектории РП рассматриваемого ПР.

Рассмотрим ПР манипулятор которого имеет структуру В, В' [П''], П. Это соответствует КЦ ПР модели «Unimation» компании «Unimate» (США), кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 4 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой усеченную шарообразную форму.

Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.5. Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая внешнее пространство шара с радиусом $R = \frac{13a}{6}$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(\frac{13a}{6}\right)^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 - x^2 - y^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.35)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внешнее пространство шара с радиусом $R = \frac{7a}{6}$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 + x^2 + y^2 - \left(\frac{7a}{6}\right)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.36)$$

D_3 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $y \geq 0$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } y \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.37)$$

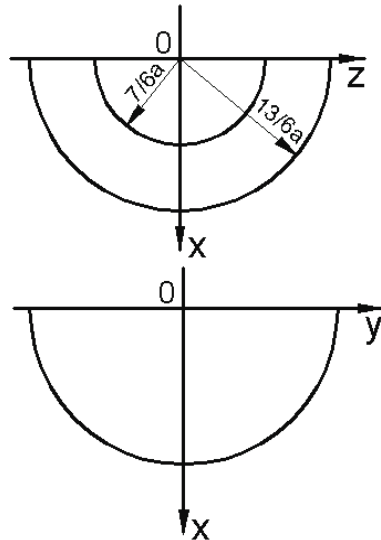


Рисунок 2.5 – Проекция РП ПР при структуре В, В' [П''], П

Булева функция, полученная на основе (2.35) – (2.37), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$D_1 \cap D_2 \cap D_3 = 1. \quad (2.38)$$

На основании Булевой функции (2.38), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\left(\left(\frac{13a}{6} \right)^2 - \left(z - \frac{a}{6} \right)^2 - x^2 - y^2 \geq 0 \right) \cap_1 \left(\left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + x^2 + y^2 - \left(\frac{7a}{6} \right)^2 \geq 0 \right) \cap_1 (y \geq 0) = 1. \quad (2.39)$$

Для реализации (2.39) разработана процедура РП – 4, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.4.

Рассмотрим ПР структура которой имеет следующий вид ВП', В'' [П''], В' [П']. Кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 5 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой усеченную тороидальную форму. Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.6. Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное ниже плоскости, $z = \frac{a}{6}$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } z - \frac{7}{6}a \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.40)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внутреннюю часть тора, образованного вращением окружности $(x - 2a)^2 + (z - \frac{a}{6})^2 = a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } 8a^2(x^2 + y^2) - \left((z - \frac{a}{6})^2 + x^2 + y^2 + 3a^2 \right)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.41)$$

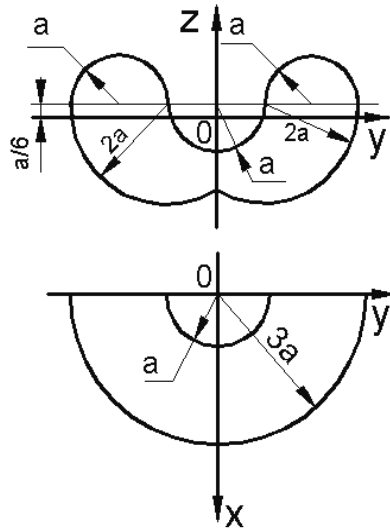


Рисунок 2.6 – Проекция РП ПР при структуре $ВП', В'' [П''], В' [П']$.

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство шара с радиусом $R = a$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } x^2 + y^2 - a^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.42)$$

D_4 – логическая переменная, задающая внутреннюю часть тора, образованного вращением окружности $(x - 2a)^2 + (z - \frac{a}{6})^2 = a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2(x^2 + y^2) - \left((z - \frac{a}{6})^2 + x^2 + y^2 - 3a^2 \right)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.43)$$

D_5 – логическая переменная, задающая внешнее пространство шара с радиусом $R = a$:

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } a^2 + (z - \frac{a}{6})^2 + x^2 + y^2 - a^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.44)$$

D_6 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное выше плоскости, $z = -2a$:

$$D_6 = \begin{cases} 1, & \text{если } z + 2a \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.45)$$

D_7 – логическая переменная, задающая внутреннюю часть тора, образованного вращением окружности $(x - a)^2 + (z - 2a)^2 = a^2$ вокруг оси

OZ:

$$D_7 = \begin{cases} 1, \text{ если } 4a^2(x^2 + y^2) - \left(\left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + x^2 + y^2 \right)^2 \leq 0, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2.46)$$

Булева функция, полученная на основе (2.40) – (2.46), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$(D_1 \cap D_2) \cup (D_3 \cap D_4 \cap \overline{D_1}) \cup (D_5 \cap D_6 \cap \overline{D_1}) \cup (D_7 \cap D_3 \cap \overline{D_6}) = 1 \quad (2.47)$$

На основании Булевой функции (2.47), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\begin{aligned} & \left(\left(z - \frac{7}{6}a \geq 0 \right) \cap_1 \left(8a^2(x^2 + y^2) - \left(\left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + x^2 + y^2 + 3a^2 \right)^2 \leq 0 \right) \right) \cup_1 \\ & \left(\left(x^2 + y^2 - a^2 \geq 0 \right) \cap_1 \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(\left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + x^2 + y^2 - 3a^2 \right)^2 \leq 0 \right) \right) \\ & \cap_1 \left(z - \frac{7}{6}a < 0 \right) \cup_1 \left(\left(a^2 + \left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + x^2 + y^2 - a^2 \geq 0 \right) \cap_1 \right. \\ & \left. (z + 2a \geq 0) \cap_1 \left(z - \frac{7}{6}a < 0 \right) \right) \cup_1 \left((x^2 + y^2 - a^2 \geq 0) \cap_1 (z + 2a < 0) \right. \\ & \left. \cap_1 \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(\left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + x^2 + y^2 \right)^2 \leq 0 \right) \right) = 1. \quad (2.48) \end{aligned}$$

Для реализации (2.48) разработана процедура РП – 5, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.5.

Рассмотрим РП структура которой имеет следующий вид $V[P']$, P' , P'' . Кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 6 строке Приложения 1. РП данного РП представляет собой усеченную цилиндрическую форму. Проекция РП данного РП, будет одинаковыми с РП со структурой КЦ П, $V[P']$, П и представлена на рисунке 2.3. Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут (2.21) – (2.24), Булева функция будет (2.25), а R – функция как (2.26). Для реализации (2.26) разработана процедура РП – 2, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.2.

Рассмотрим РП структура которой имеет следующий вид $V[V']$, $[P'']V'$, $V'[P'']$. Кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 7 строке Приложения 1. РП данного РП представляет собой усеченную тороидальную форму. Проекция РП данного РП, представлены на рисунке 2.7.

Логические переменные задающие граничные поверхности в данном

случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное левее плоскости, $x = \frac{a}{6}$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x - \frac{a}{6} \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.49)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство шара с радиусом $R = 2a$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 + \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 + y^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.50)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство шара с радиусом $r = a$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - y^2 - \left(z + \frac{5a}{6}\right)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.51)$$

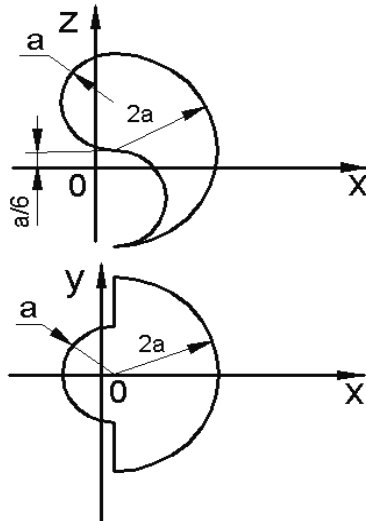


Рисунок 2.7 – Проекция РП ПР при структуре $ВВ', [П'']В', В' [П'']$

D_4 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство шара с радиусом $r = a$:

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - y^2 - \left(z - \frac{7a}{6}\right)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.52)$$

Булева функция, полученная на основе (2.49) – (2.52), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$(D_1 \cap D_2 \cap D_3) \cup (\overline{D_1} \cap D_4) = 1. \quad (2.52)$$

На основании Булевой функции (2.52), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\left(\left(x - \frac{a}{6} \geq 0\right) \cap_1 \left(4a^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 + \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 + y^2 \leq 0\right) \cap_1$$

$$\left(a^2 - \left(x - \frac{a}{6} \right)^2 - y^2 - \left(z + \frac{5a}{6} \right)^2 \geq 0 \right) \cup_1$$

$$\left(\left(x - \frac{a}{6} < 0 \right) \cap_1 \left(a^2 - \left(x - \frac{a}{6} \right)^2 - y^2 - \left(z - \frac{7a}{6} \right)^2 \leq 0 \right) \right) = 1. \quad (2.53)$$

Для реализации (2.53) разработана процедура РП – 6, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.6.

Рассмотрим ПР структура которой имеет следующий вид ПВ, [П']В', [П']. Кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 8 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой сложную цилиндрическую форму. Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.8.

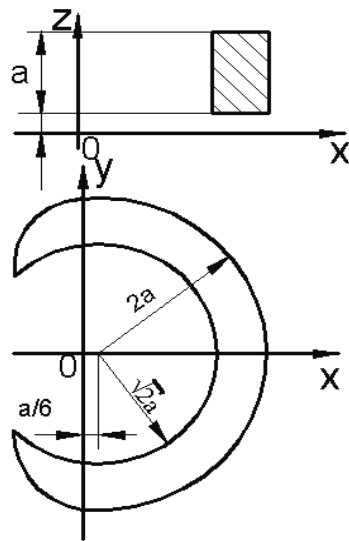


Рисунок 2.8 – Проекция РП ПР при структуре ПВ, [П']В', [П'].

Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное выше плоскости, $z = \frac{a}{6}$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } z - \frac{a}{6} \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.54)$$

D_2 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное ниже плоскости, $z = \frac{7a}{6}$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{7a}{6} - z \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.55)$$

D_3 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $x = 0$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.56)$$

D_4 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство цилиндра с радиусом $R = 2a$:

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - y^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.57)$$

D_5 – логическая переменная, задающая внешнее пространство цилиндра с радиусом $r = \sqrt{2}a$:

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 + y^2 - 2a^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.58)$$

D_6 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство смещенного по оси OY на величину $\frac{7a}{6}$ цилиндра с радиусом $r = \sqrt{2}a$:

$$D_6 = \begin{cases} 1, & \text{если } 2a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - \left(y - \frac{7a}{6}\right)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.59)$$

D_7 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство смещенного по оси OY на величину $-\frac{5a}{6}$ цилиндра с радиусом $r = \sqrt{2}a$:

$$D_7 = \begin{cases} 1, & \text{если } 2a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - \left(y + \frac{5a}{6}\right)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.60)$$

Булева функция, полученная на основе (2.54) – (2.60), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$(D_1 \cap D_2) \cap ((D_3 \cap D_4 \cap D_5) \cup (\overline{D_3} \cap D_6) \cup (\overline{D_3} \cap D_7)) = 1. \quad (2.61)$$

На основании Булевой функции (2.61), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\begin{aligned} & \left(\left(z - \frac{a}{6} \geq 0 \right) \cap_1 \left(\frac{7a}{6} - z \geq 0 \right) \right) \cap_1 \left((x \geq 0) \cap_1 \left(4a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - y^2 \geq 0 \right) \right. \\ & \left. \cap_1 \left(\left(x - \frac{a}{6}\right)^2 + y^2 - 2a^2 \geq 0 \right) \right) \cup_1 ((x < 0) \cap_1 \\ & \left(\left(2a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - \left(y - \frac{7a}{6}\right)^2 \geq 0 \right) \cup_1 ((x < 0) \cap_1 \right. \\ & \left. \left(\left(2a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - \left(y + \frac{5a}{6}\right)^2 \geq 0 \right) \right) \right) = 1. \quad (2.62) \end{aligned}$$

Для реализации (2.53) разработана процедура РП – 7, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.7.

Рассмотрим ПР КЦ которой имеет следующую структуру $V[\Pi']$, V'' , Π' . Это соответствует КЦ ПР модели «Универсал 15.01» (СССР), кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 9 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой сложную тороидальную форму. Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.9.

Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное выше плоскости, $z = 0$

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } z \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.63)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внешнее пространство цилиндра с радиусом, $r = \frac{5a}{6}$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } x^2 + y^2 - \frac{25a^2}{36} \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.64)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство цилиндра с радиусом, $r = \frac{7a}{6}$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } x^2 + y^2 - \frac{49a^2}{36} \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.65)$$

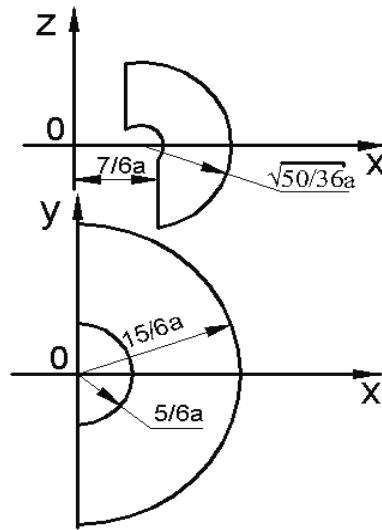


Рисунок 2.9 – Проекция РП ПР при структуре $V[\Pi', V'', \Pi']$.

D_4 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + z^2 = \frac{50a^2}{36}$ вокруг оси OZ :

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 - \frac{14a^2}{36}\right)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.66)$$

D_5 – логическая переменная, задающая внешнее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + z^2 = \frac{a^2}{36}$ вокруг оси OZ :

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 + \frac{35a^2}{36}\right)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.67)$$

Булева функция, полученная на основе (2.63) – (2.67), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$(D_1 \cap D_2 \cap D_4 \cap D_5) \cup (\overline{D_1} \cap D_3 \cap D_4 \cap D_5) = 1. \quad (2.68)$$

На основании Булевой функции (2.68), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\begin{aligned} & \left((z \geq 0) \cap_1 \left(x^2 + y^2 - \frac{25a^2}{36} \geq 0 \right) \cap_1 \right. \\ & \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 - \frac{14a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \cap_1 \right. \\ & \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 + \frac{35a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \right) \\ & \left((z < 0) \cap_1 \left(x^2 + y^2 - \frac{49a^2}{36} \geq 0 \right) \cap_1 \right. \\ & \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 - \frac{14a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \cap_1 \right. \\ & \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 + \frac{35a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \right) = 1. \quad (2.69) \end{aligned}$$

Для реализации (2.53) разработана процедура РП – 8, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.8.

Рассмотрим ПР КЦ которой имеет следующую структуру В[П'], В'', П''. Кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 10 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой сложную тороидальную форму. Проекции РП данного ПР, представлены на рисунке 2.10.

Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное ниже плоскости, $z = \frac{a}{6}$

$$D_1 = \begin{cases} 1, \text{ если } \frac{a}{6} - z \geq 0, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2.70)$$

D_2 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное ниже плоскости, $z = -\frac{a}{6}$

$$D_2 = \begin{cases} 1, \text{ если } \frac{a}{6} + z \geq 0, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2.71)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + z^2 = \frac{50a^2}{36}$ вокруг оси OZ:

$$D_3 = \begin{cases} 1, \text{ если } 4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 - \frac{14a^2}{36} \right)^2 \leq 0, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2.72)$$

D_4 – логическая переменная, задающая внешнее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + z^2 = \frac{a^2}{36}$ вокруг оси OZ:

$$D_4 = \begin{cases} 1, \text{ если } 4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 + \frac{35a^2}{36} \right)^2 \leq 0, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2.73)$$

Булева функция, полученная на основе (2.70) – (2.73), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$(D_1 \cap \overline{D_2} \cap D_3 \cap D_4) \cup (D_2 \cap D_3 \cap D_4) = 1. \quad (2.74)$$

На основании Булевой функции (2.74), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\left(\left(\left(\frac{a}{6} - z \geq 0 \right) \cap_1 \left(\frac{a}{6} + z < 0 \right) \cap_1 \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 - \frac{14a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \cap_1 \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 + \frac{35a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \right) \cap_1 \left(\left(\frac{a}{6} - z \geq 0 \right) \cap_1 \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 - \frac{14a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \cap_1 \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 + \frac{35a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \right) = 1. \quad (2.74)$$

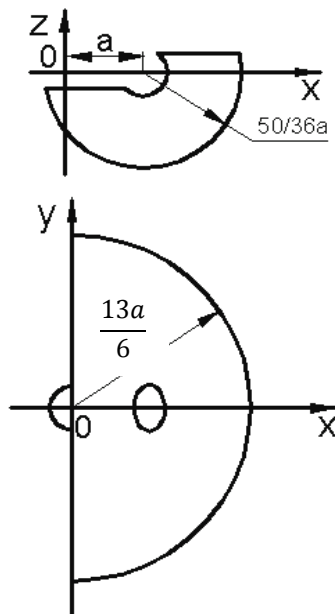


Рисунок 2.10 – Проекция РП ПР при структуре В[П'], В'', П''.

Для реализации (2.74) разработана процедура РП – 9, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.9.

Рассмотрим ПР КЦ которой имеет следующую структуру В[П'], В''[П'], В'[П']. Кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 11 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой сложную шарообразную форму. Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.11.

Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство

расположенное правее плоскости, $x = 0$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.75)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внешнее пространство цилиндра с радиусом, $r = a$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } x^2 + y^2 - a^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.76)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + z^2 = 2a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + z^2 - a^2)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.77)$$

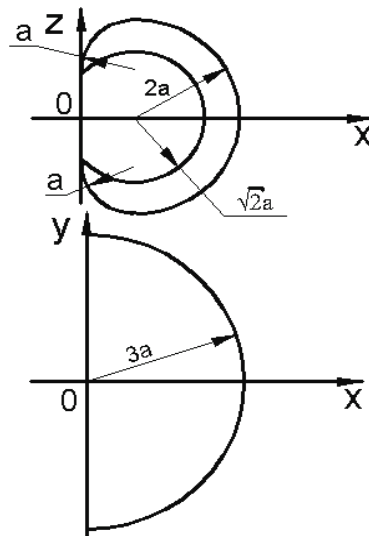


Рисунок 2.11 – Проекция РП ПР при структуре $V[P'], V''[P'], V'[P']$.

D_4 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + z^2 = 9a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + z^2 - 8a^2)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.78)$$

D_5 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + (z - 2a)^2 = a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + (z - 2a)^2)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.79)$$

D_6 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + (z + 2a)^2 = a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_6 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + (z + 2a)^2)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.80)$$

Булева функция, полученная на основе (2.75) – (2.80), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$D_1 \cap ((D_2 \cap D_3 \cap D_4) \cup (\overline{D_2} \cap D_3 \cap D_5) \cup (\overline{D_2} \cap D_3 \cap D_6)) = 1. \quad (2.81)$$

На основании Булевой функции (2.81), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\begin{aligned}
 & (x \geq 0) \cap_1 ((x^2 + y^2 - a^2 \geq 0) \cap_1 \\
 & (4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + z^2 - a^2)^2 \geq 0) \cap_1 \\
 & 4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + z^2 - 8a^2)^2 \leq 0) \\
 & \cup_1 ((x^2 + y^2 - a^2 < 0) \cap_1 \\
 & (4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + z^2 - a^2)^2 \geq 0) \cap_1 \\
 & (4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + (z - 2a)^2)^2 \leq 0)) \\
 & \cup_1 ((x^2 + y^2 - a^2 < 0) \cap_1 \\
 & (4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + z^2 - a^2)^2 \geq 0) \cap_1 \\
 & (4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + (z + 2a)^2)^2 \leq 0)) = 1. \quad (2.82)
 \end{aligned}$$

Для реализации (2.74) разработана процедура РП – 10, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.10.

Рассмотрим ПР КЦ которой имеет следующую структуру $V[\Pi']$, $V''[\Pi']$, $V'[\Pi'']$. Кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 12 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой сложную тороидальную форму. Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.12.

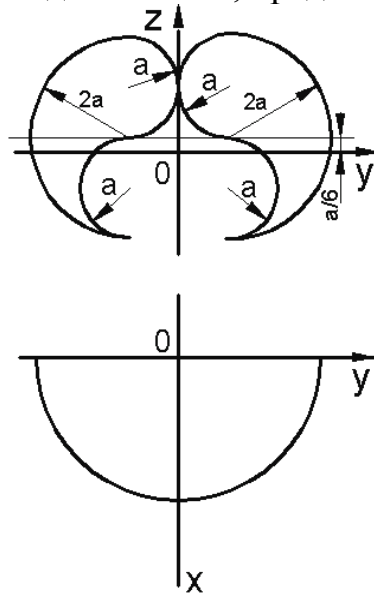


Рисунок 2.12 – Проекция РП ПР при структуре $V[\Pi']$, $V''[\Pi']$, $V'[\Pi'']$.

Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $x = 0$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.83)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство цилиндра с радиусом, $r = a$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } a^2 - x^2 - y^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.84)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + \left(z + \frac{5a}{6}\right)^2 = a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_3 = \begin{cases} 1, \text{ если } 4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z + \frac{5a}{6}\right)^2\right)^2 \geq 0, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2.85)$$

D_4 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + \left(z - \frac{7a}{6}\right)^2 = a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_4 = \begin{cases} 1, \text{ если } 4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{7a}{6}\right)^2\right)^2 \leq 0, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2.86)$$

D_5 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство тора образованного вращением окружности $(x - a)^2 + \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 = 4a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_5 = \begin{cases} 1, \text{ если } 4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 - 3a^2\right)^2 \leq 0, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2.87)$$

Булева функция, полученная на основе (2.83) – (2.87), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$D_1 \cap ((D_2 \cap D_4) \cup (\overline{D_2} \cap D_3 \cap D_5)) = 1. \quad (2.88)$$

На основании Булевой функции (2.88), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\begin{aligned} & (x \geq 0) \cap_1 \left((a^2 - x^2 - y^2 \geq 0) \cap_1 \right. \\ & \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{7a}{6}\right)^2\right)^2 \leq 0 \right) \cap_1 \right. \\ & \left. \cup_1 \left((a^2 - x^2 - y^2 < 0) \cap_1 \right. \right. \\ & \left. \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z + \frac{5a}{6}\right)^2\right)^2 \geq 0 \right) \cap_1 \right. \right. \\ & \left. \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 - 3a^2\right)^2 \leq 0 \right) \right) \right) = 1. \quad (2.89) \end{aligned}$$

Для реализации (2.89) разработана процедура РП – 11, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.11.

Рассмотрим ПР КЦ которой имеет следующую структуру $B[B']$, $[П'] B'$, $[П']$. Кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 13 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой сложную шарообразную форму. Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.13.

Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $x = 0$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.90)$$

D_2 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное выше плоскости, $z = \frac{a}{6}$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } z - \frac{a}{6} \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.91)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство шара с радиусом, $r = \sqrt{2}a$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } x^2 + y^2 + \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 - 2a^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.92)$$

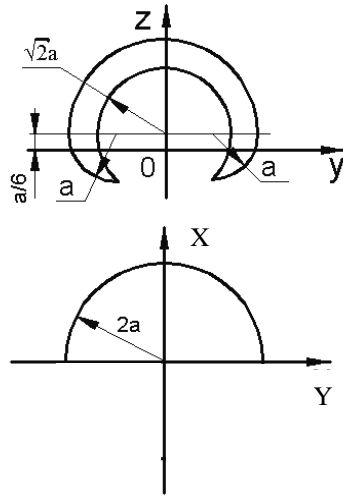


Рисунок 2.13 – Проекция РП ПР при структуре $V[V'], [П'] V', [П']$.

D_4 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство шара с радиусом, $r = 2a$:

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2 - x^2 - y^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.93)$$

D_5 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство тора образованного вращением окружности $(x + a)^2 + \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 = a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{a}{6}\right)^2\right)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.94)$$

Булева функция, полученная на основе (2.90) – (2.94), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$(D_1 \cap D_2 \cap D_3 \cap D_4) \cup (D_1 \cap \overline{D_2} \cap D_3 \cap D_5) = 1. \quad (2.95)$$

На основании Булевой функции (2.95), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\begin{aligned} & ((x \geq 0) \cap_1 (z - \frac{a}{6} \geq 0) \cap_1 (x^2 + y^2 + (z - \frac{a}{6})^2 - 2a^2 \geq 0) \cap_1 \\ & (4a^2 - x^2 - y^2 - (z - \frac{a}{6})^2 \geq 0) \cup_1 ((x \geq 0) \cap_1 (z - \frac{a}{6} < 0) \cap_1 \\ & (x^2 + y^2 + (z - \frac{a}{6})^2 - 2a^2 \geq 0) \cap_1 \\ & (4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + (z - \frac{a}{6})^2)^2 \leq 0)) = 1 \quad (2.96) \end{aligned}$$

Для реализации (2.96) разработана процедура РП – 12, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.12.

Рассмотрим ПР манипулятор которого имеет структуру ВВ', [П']В', [П'']. Это соответствует КЦ ПР модели «Trallfa» компании «Devillbis» (Норвегия), кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 14 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой усеченную шарообразную форму.

Проекции РП данного ПР, представлены на рисунке 2.14. Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $x = 0$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.97)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство шара с радиусом, $r = 2a$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2 - x^2 - y^2 - (z - \frac{a}{6})^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.98)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство шара с радиусом, $r = a$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } x^2 + y^2 + (z - \frac{7a}{6})^2 - a^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.99)$$

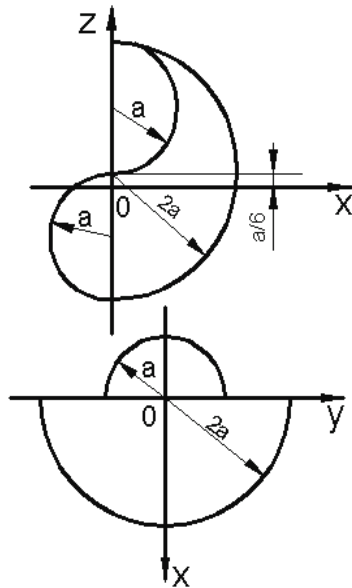


Рисунок 2.14 – Проекция РП ПР при структуре ВВ', [П']В', [П'']

D_4 – логическая переменная, задающая внешнее пространство шара с радиусом, $r = a$:

$$D_4 = \begin{cases} 1, \text{ если } x^2 + y^2 + \left(z + \frac{5a}{6}\right)^2 - a^2 \geq 0, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2.100)$$

Булева функция, полученная на основе (2.97) – (2.100), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$(D_1 \cap D_2 \cap D_3) \cup (\overline{D_1} \cap D_4) = 1. \quad (2.101)$$

На основании Булевой функции (2.101), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\begin{aligned} & ((x \geq 0) \cap_1 \left(4a^2 - x^2 - y^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 \geq 0\right) \cap_1 \\ & \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{7a}{6}\right)^2 - a^2 \geq 0\right)) \cup_1 \\ & ((x < 0) \cap_1 \left(x^2 + y^2 + \left(z + \frac{5a}{6}\right)^2 - a^2 \geq 0\right)) = 1. \quad (2.102) \end{aligned}$$

Для реализации (2.102) разработана процедура РП – 13, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.13.

Рассмотрим ПР манипулятор которого имеет структуру ВВ', [П'']В', [П']. Это соответствует КЦ ПР модели «IAX ROBOT» компании «Токио Кеики» (Япония), кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 15 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой усеченную шарообразную форму.

Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.15. Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство

расположенное правее плоскости, $x = \frac{a}{6}$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x - \frac{a}{6} \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.103)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство шара с радиусом, $r = 2a$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } 4a^2 - x^2 - y^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.104)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство шара с радиусом, $r = \sqrt{2}a$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } x^2 + y^2 + \left(z - \frac{7a}{6}\right)^2 - 2a^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.105)$$

D_4 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство тора образованного вращением окружности $\left(x - \frac{a}{6}\right)^2 + \left(z - \frac{7a}{6}\right)^2 = a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{a^2}{9}(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{7a}{6}\right)^2 - \frac{8a^2}{9}\right)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.106)$$

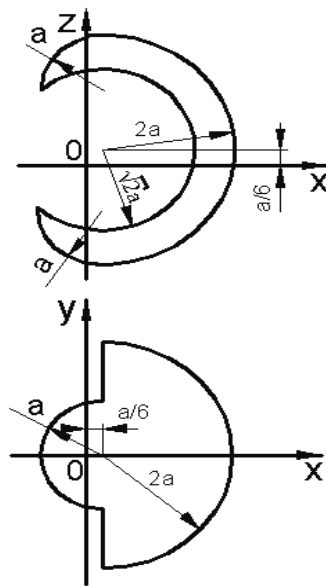


Рисунок 2.15 – Проекция РП ПР при структуре $ВВ'$, $[П'']В'$, $[П']$.

D_5 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство тора образованного вращением окружности $\left(x - \frac{a}{6}\right)^2 + \left(z + \frac{5a}{6}\right)^2 = a^2$ вокруг оси OZ :

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{a^2}{9}(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z + \frac{5a}{6}\right)^2 - \frac{8a^2}{9}\right)^2 \leq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.107)$$

Булева функция, полученная на основе (2.103) – (2.107), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$(D_1 \cap D_2 \cap D_3) \cup (\overline{D_1} \cap D_4) \cup (\overline{D_1} \cap D_5) = 1. \quad (2.108)$$

На основании Булевой функции (2.108), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\begin{aligned} & ((x \geq 0) \cap_1 \left(4a^2 - x^2 - y^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 \geq 0\right) \cap_1 \\ & \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{7a}{6}\right)^2 - 2a^2 \geq 0\right)) \cup_1 ((x < 0) \cap_1 \\ & \left(\frac{a^2}{9}(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{7a}{6}\right)^2 - \frac{8a^2}{9}\right)^2 \leq 0\right)) \cup_1 ((x < 0) \cap_1 \\ & \left(\frac{a^2}{9}(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z + \frac{5a}{6}\right)^2 - \frac{8a^2}{9}\right)^2 \leq 0\right)) = 1 \quad (2.109) \end{aligned}$$

Для реализации (2.102) разработана процедура РП – 14, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.14.

Рассмотрим ПР КЦ которой имеет следующую структуру $V[\Pi']$, Π , Π' . Кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 16 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой усеченную цилиндрическую форму. Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.16. Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $x = 0$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.110)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство ограниченное цилиндром радиуса $R = \frac{13a}{6}$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(\frac{13a}{6}\right)^2 - (x^2 + y^2) \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.111)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство цилиндра с радиусом $r = \frac{7a}{6}$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } (x^2 + y^2) - \left(\frac{7a}{6}\right)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.112)$$

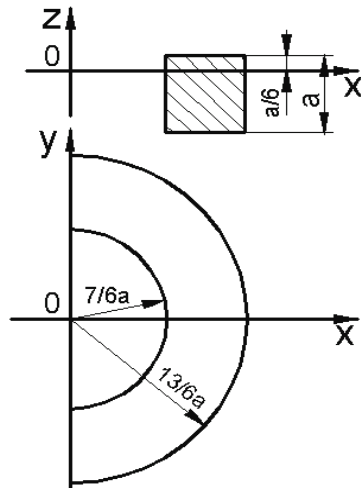


Рисунок 2.16 – Проекция РП ПР при структуре В[П'], П, П'.

D_4 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное ниже плоскости, $z = \frac{a}{6}$:

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{a}{6} - z \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.113)$$

D_5 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное выше плоскости, $z = -\frac{5}{6}a$:

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } z + \frac{5}{6}a \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.114)$$

Булева функция, полученная на основе (2.20) – (2.24), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$D_1 \cap D_2 \cap D_3 \cap D_4 \cap D_5 = 1. \quad (2.115)$$

На основании Булевой функции (2.115), получена соответствующая R – функция, вида:

$$(x \geq 0) \cap_1 \left(\left(\frac{13a}{6} \right)^2 - (x^2 + y^2) \geq 0 \right) \cap_1 \left((x^2 + y^2) - \left(\frac{7a}{6} \right)^2 \geq 0 \right) \cap_1 \left(\frac{a}{6} - z \geq 0 \right) \cap_1 \left(z + \frac{5}{6}a \geq 0 \right) = 1. \quad (2.116)$$

Для реализации (2.116) разработана процедура РП – 15, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.15.

Рассмотрим ПР манипулятор которого имеет структуру В, В', П''. Это соответствует КЦ ПР модели «Mechanical» компании «Unimation» (США), кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 17 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой усеченную шарообразную форму.

Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.17. Логические переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство

расположенное правее плоскости, $x = 0$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.117)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство шара с радиусом, $r = \frac{7a}{6}$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{49a^2}{36} - x^2 - y^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.118)$$

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство шара с радиусом, $r = \frac{a}{6}$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } x^2 - y^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 - \frac{a^2}{36} \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.119)$$

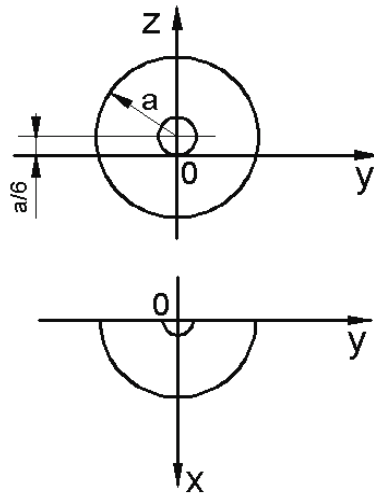


Рисунок 2.17 – Проекция РП ПР при структуре В, В', П''.

Булева функция, полученная на основе (2.117) – (2.119), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$D_1 \cap D_2 \cap D_3 = 1. \quad (2.120)$$

На основании Булевой функции (2.120), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\left((x \geq 0) \cap_1 \left(\frac{49a^2}{36} - x^2 - y^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 \geq 0 \right) \cap_1 \left(x^2 - y^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 - \frac{a^2}{36} \geq 0 \right) \right) = 1 \quad (2.121)$$

Для реализации (2.116) разработана процедура РП – 16, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.16.

Рассмотрим ПР манипулятор которого имеет структуру П, В, П'. Это соответствует КЦ ПР модели «Versatran» компании «AMF» (США), кинематическая структура и вид РП, которой приведен в 18 строке Приложения 1. РП данного ПР представляет собой усеченную цилиндрическую форму.

Проекция РП данного ПР, представлены на рисунке 2.18. Логические

переменные задающие граничные поверхности в данном случае будут следующими.

D_1 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное правее плоскости, $x = 0$:

$$D_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.122)$$

D_2 – логическая переменная, задающая внутреннее пространство ограниченное цилиндром радиуса $R = \frac{7a}{6}$:

$$D_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(\frac{7a}{6}\right)^2 - (x^2 + y^2) \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.123)$$

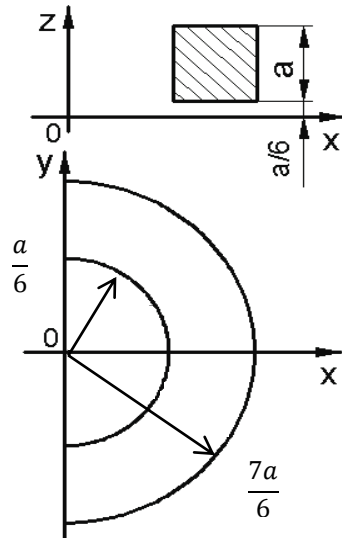


Рисунок 2.18 – Проекция РП ПР при структуре $\Pi, В, \Pi'$.

D_3 – логическая переменная, задающая внешнее пространство цилиндра с радиусом $r = \frac{a}{6}$:

$$D_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } (x^2 + y^2) - \left(\frac{a}{6}\right)^2 \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.124)$$

D_4 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное ниже плоскости, $z = \frac{7}{6}a$:

$$D_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{7}{6}a - z \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.125)$$

D_5 – логическая переменная, задающая полупространство расположенное выше плоскости, $z = \frac{1}{6}a$:

$$D_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } z - \frac{1}{6}a \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2.126)$$

Булева функция, полученная на основе (2.122) – (2.126), описывающая РП в этом случае, имеет следующий вид:

$$D_1 \cap D_2 \cap D_3 \cap D_4 \cap D_5 = 1. \quad (2.127)$$

На основании Булевой функции (2.27), получена соответствующая R – функция, вида:

$$\begin{aligned} & (x \geq 0) \cap_1 \left(\left(\frac{7a}{6} \right)^2 - (x^2 + y^2) \geq 0 \right) \cap_1 \left((x^2 + y^2) - \left(\frac{a}{6} \right)^2 \geq 0 \right) \\ & \cap_1 \left(\frac{7}{6}a - z \geq 0 \right) \cap_1 \left(z - \frac{1}{6}a \geq 0 \right) = 1. \quad (2.128) \end{aligned}$$

Для реализации (2.26) разработана процедура РП – 17, блок-схема которой приведена в Приложении 2 на рисунке П2.17.

2.3 Формализованное описание процедуры выбора модели серийно-выпускаемого ПР при роботизации технологических процессов

Для осуществления выбора модели серийно-выпускаемого ПР по РП необходимо соответствующее описание геометрических характеристик технологической операции. Технологическая операция задается траекторией движения рабочего органа, и множеством точек позиционирования. Данную траекторию можно аппроксимировать множеством точек $A_j(x_j, y_j, z_j)$, $j=1,2,\dots,m$, где m - количество точек, аппроксимирующих траекторию движения рабочего органа. На координаты точек $A_j(x_j, y_j, z_j)$ наложены следующие ограничения [69]:

$$d_{\text{пр}} \leq l_{j,j+1} \leq d_{\text{то}},$$

$$l_{j,j+1} = \sqrt{(x_j - x_{j+1})^2 + (y_j - y_{j+1})^2 + (z_j - z_{j+1})^2},$$

где $d_{\text{пр}}$ – погрешность позиционирования ПР,

$d_{\text{то}}$ – заданная погрешность выполнения движения вдоль заданной траектории, определяемая особенностями технологической операции,

$l_{j,j+1}$ – расстояние между точками $A_j(x_j, y_j, z_j)$ и $A_{j+1}(x_{j+1}, y_{j+1}, z_{j+1})$.

Если все точки $A_j(x_j, y_j, z_j)$, ($j=1,2,\dots,m$), принадлежат РП робота, то и траектория полностью принадлежит РП ПР. Это утверждение верно с точностью до значения $l_{j,j+1}$. Условие принадлежности точек $A_j(x_j, y_j, z_j)$, ($j=1,2,\dots,m$), РП ПР (2.11) можно представить в виде следующего логического выражения:

$$\forall A_j(x_j, y_j, z_j), j = 1, 2, \dots, m, L(D_k(x, y, z) \geq 0) = 1. \quad (2.129)$$

На основе выражений (2.8) и (2.129) можно осуществить процедуры предварительного выбора модели серийно-выпускаемого ПР для роботизации рассматриваемой технологической операции (ТО).

Для организации процедуры выбора модели ПР необходимо создать базу данных серийно-выпускаемых промышленных роботов. База данных должна содержать в себе параметры роботов, необходимые при их выборе для роботизации рассматриваемого технологического процесса. Задание таких параметров, как грузоподъемность, погрешность позиционирования, область применения, вид привода, вид системы управления, не представляет

трудности. Необходимо также однозначно определить и геометрические параметры роботов. Для описания геометрических параметров применен математический аппарат R-функций. При этом в зависимости от сложности кинематической цепи робота будет изменяться и вид рабочего пространства робота, как геометрического объекта.

Для разработки алгоритма выбора моделей серийно-выпускаемых ПР при роботизации заданной операции необходимо задать параметры как роботов, так и параметры роботизируемой операции (РО) [68, 69].

Параметры роботизируемой операции зададим в виде множеств $T(p_j)$, $V(v_k)$ (1), в виде следующего вектора:

$$TV(M_{TO}, d_{TO}, r_{и}, r_{п}, r_y, P_y(x_y, y_y, z_y), A_j(x_j, y_j, z_j), (j = 1, 2, \dots, m)), \quad (2.130)$$

где M_{TO} – требуемая грузоподъемность для выполнения рассматриваемой ТО,

d_{TO} – требуемая погрешность позиционирования для выполнения рассматриваемой ТО,

$r_{и}$ – требуемый вид исполнения узлов робота для роботизации рассматриваемой ТО,

$r_{п}$ – требуемый вид привода степеней подвижности робота для выполнения рассматриваемой ТО,

r_y – требуемый вид системы программного управления робота для роботизации рассматриваемой ТО,

$P_y(x_y, y_y, z_y)$ – координаты точки установки ПР в составе РТК,

$A_j(x_j, y_j, z_j)$ – требуемые точки позиционирования рабочего органа для выполнения рассматриваемой производственной операции, заданные в системе координат связанной с размещением оборудования и ПР на производственной площади,

m – число точек позиционирования.

Параметры каждой серийно-выпускаемых модели ПР, на основе в виде следующего вектора:

$$M_i(i, C_i, \Phi_i, S_i, P_i, M_{\text{ПР}}^i, d_{\text{ПР}}^i, r_{и}^i, r_{п}^i, r_y^i, L_i(D_k(x, y, z) \geq 0) = 1,$$

$$(k = 1, 2, \dots, r), (i = 1, 2, \dots, n)), \quad (2.130)$$

где i – номер по порядку i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

C_i – страна производитель i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

Φ_i – фирма производитель i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

S_i – стоимость i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

P_i – рисунок с указанием геометрических размеров манипулятора, рабочего пространства i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

$M_{\text{ПР}}^i$ – грузоподъемность i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

$d_{\text{ПР}}^i$ – погрешность позиционирования i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

$r_{и}^i$ – область применения i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

$r_{п}^i$ – вид привода i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

r_y^i – вид системы программного управления i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

$L_i(D_k(x, y, z) \geq 0) = 1$ – логическая функция описывающая рабочее пространство i – той модели серийно-выпускаемого ПР,

$D_k(x, y, z) \geq 0, (k=1,2,\dots,r), k$ – тая часть пространства, ограниченная элементарной поверхностью, описывающейся простейшим неравенством, задающим или аппроксимирующим границу РП,

r – число элементарных поверхностей,

n – количество рассматриваемых моделей серийно-выпускаемых ПР.

Алгоритм предварительного (упрощенного) выбора моделей серийно-выпускаемых роботов, для роботизации заданного производственного процесса состоит из следующих шагов [69].

НАЧАЛО.

Шаг 0. Ввод исходных данных: Ввод векторов

$TV(M_{TO}, d_{TO}, r_{и}, r_{п}, r_y, P_y(x_y, y_y, z_y), A_j(x_j, y_j, z_j), (j = 1, 2, \dots, m)),$

$M_i(i, C_i, \Phi_i, S_i, P_i, M_{ПР}^i, d_{ПР}^i, r_{и}^i, r_{п}^i, r_y^i, L_i(D_k(x, y, z) \geq 0) = 1,$

$(k = 1, 2, \dots, r), (i = 1, 2, \dots, n)), v$ – количество дискретных значений полного вращения ПР вокруг точки $P_y(x_y, y_y, z_y)$.

Шаг 1. $i=1$.

Шаг 2. Если выполняется условие $M_{ПР}^i - M_{TO} \geq 0$, то перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 12.

Шаг 3. Если выполняется условие $d_{TO} - d_{ПР}^i \geq 0$, то перейти к шагу 4, в противном случае перейти к шагу 12.

Шаг 4. Если выполняется условие $r_{и} = r_{и}^i$, то перейти к шагу 5, в противном случае перейти к шагу 12.

Шаг 5. Если выполняется условие $r_{п} = r_{п}^i$, то перейти к шагу 6, в противном случае перейти к шагу 12.

Шаг 6. Если выполняется условие $r_y = r_y^i$, то перейти к шагу 7, в противном случае перейти к шагу 12.

Шаг 7. $j=1$.

Шаг 8. $x_j = x_j - x_y, y_j = y_j - y_y, z_j = z_j - z_y$.

Шаг 9. Если выполняется условие $L_i(D_k(x_j, y_j, z_j) \geq 0) = 1$, то перейти к шагу 9, в противном случае перейти к шагу 12.

Шаг 10. $j=j+1$.

Шаг 11. Если выполняется условие $j \leq m$, то перейти к шагу 9, в противном случае перейти к шагу 12.

Шаг 12. $\alpha = \frac{360}{v}$.

Шаг 13. $k=1$.

Шаг 14. $j=1$.

Шаг 15. $x_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2} \cdot \text{Cos}\left(\text{arctg} \frac{x_j}{y_j} + k\alpha\right),$

$$y_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2} \cdot \sin\left(\arctg \frac{x_j}{y_j} + k\alpha\right), z_j = z_j.$$

Шаг 16. $j = j + 1$.

Шаг 15. Если выполняется условие $j \leq m$, то перейти к шагу 13, в противном случае перейти к шагу 16.

Шаг 16. $k = k + 1$.

Шаг 17. Если выполняется условие $k \leq v$, то перейти к шагу 9, в противном случае перейти к шагу 20.

Шаг 18. Вывод параметров вектора M_i , описывающего i – тый серийно-выпускаемый ПР.

Шаг 19. $i = i + 1$.

Шаг 20. Если выполняется условие $i \leq n$, то перейти к шагу 2, в противном случае перейти к шагу 14.

Шаг 21. КОНЕЦ.

В результате работы алгоритма на шаге 11, выводятся параметры серийно-выпускаемых ПР, удовлетворяющим требованиям роботизируемого производственного процесса. Если введен в рассмотрение функционал вида (2), то его значение вычисляется для каждой выбранной модели ПР, Далее сравнивая значения вычисленных функционалов, можно выбрать наиболее приемлемую модель или несколько моделей ПР.

Наиболее сложно производить выбор ПР по рабочим пространствам, так как на этом этапе необходимо рассматривать различные взаимные расположения ПР относительно технологического и вспомогательного оборудования [69]. В данном алгоритме ПР вращается вокруг точки $P_y(x_y, y_y, z_y)$ на 360° . В этом случае можно найти такое положение ПР относительно требуемых точек позиционирования, при котором они будут охватываться РП ПР. Такая постановка задачи приводит к более полному учету особенностей РП ПР.

2.4 Разработка алгоритма выбора модели серийно-выпускаемого ПР при роботизации технологических процессов

Выбор модели серийно – выпускаемого ПР который по своим характеристикам удовлетворяет требованиям заданного ТП, производится в два этапа. Первый этап – это выбор по численным параметрам, таких как грузоподъемность, погрешность позиционирования и т.п. Второй этап это выбор по РП ПР. Это наиболее сложный процесс выбора модели ПР.

Для каждой модели ПР первоначально необходимо произвести анализ соответствия по требуемым численным характеристикам заданной ТО. Для реализации этой процедуры разработана процедура ВПП, блок схема которой представлена на рисунке 2.19.

Вводятся требуемые для выполнения заданной ТО параметры, в виде вектора $TV(M_{ТО}, d_{ТО}, r_{и}, r_{п}, r_{у})$ и параметры рассматриваемой i – той модели ПР, в виде вектора $M_i(M_{ПР}^i, d_{ПР}^i, r_{и}^i, r_{п}^i, r_{у}^i)$.

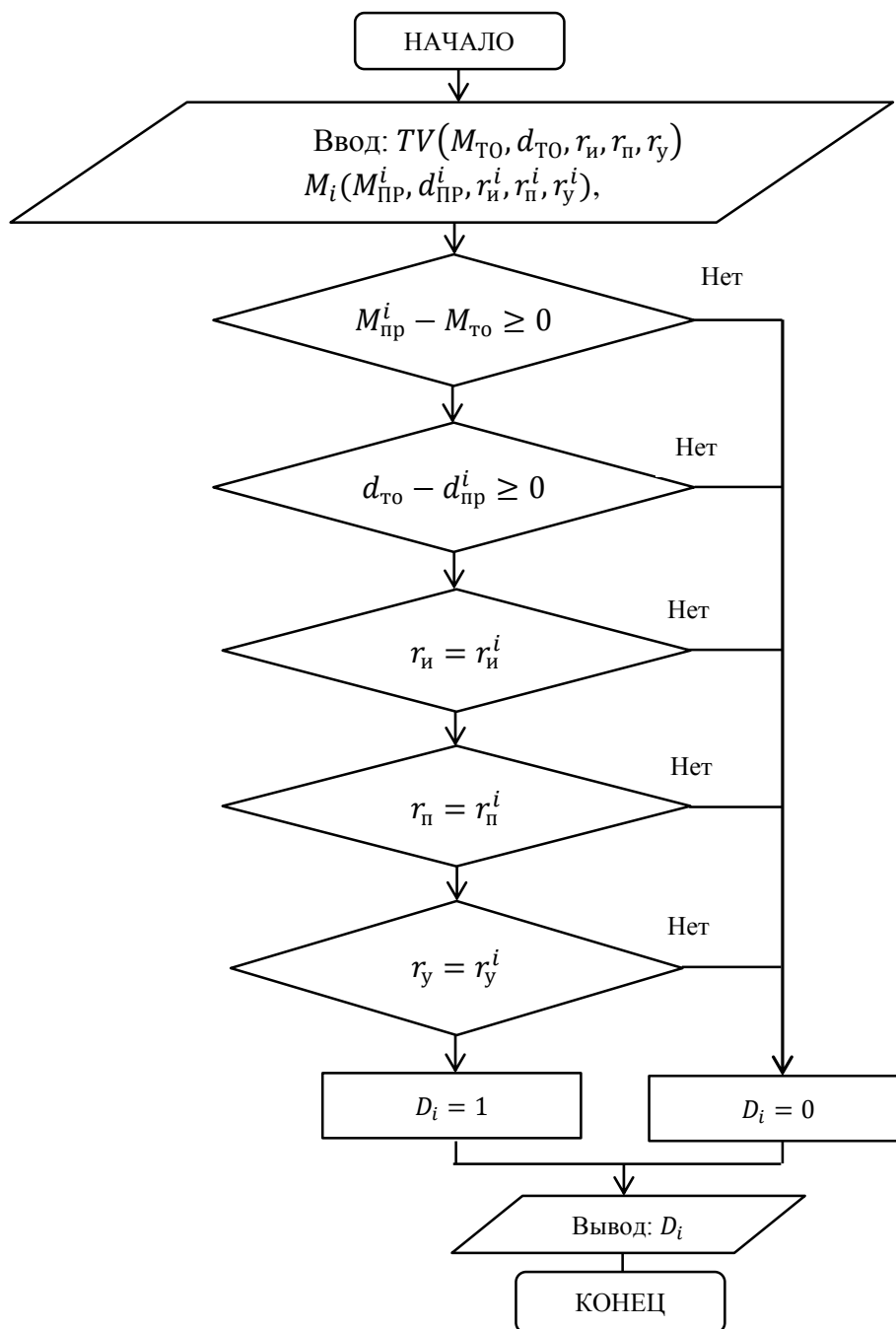


Рисунок 2.19. – Блок-схема процедуры ВПП.

Далее проверяется логическое условия (2.8), если параметры рассматриваемой модели ПР соответствуют требованиям ТО, то значение логической переменной $D_i = 1$, в противном случае $D_i = 0$.

На следующих шагах производится выбор модели ПР по РП. РП каждого ПР должно быть формализовано в виде процедур, блок – схемы которых приведены в приложении 2. Задача выбора модели ПР по РП заключается в определении такого взаимного расположения робота $P_y(x_y, y_y, z_y)$ относительно требуемых точек позиционирования $A_j(x_j, y_j, z_j)$, ($j = 1, 2, \dots, m$) при котором выполнялось условие (2.8).

Систему координат $OXYZ$ выберем таким образом, что бы

первоначальное расположение требуемых точек позиционирования $A_j(x_j, y_j, z_j)$, $(j = 1, 2, \dots, m)$ удовлетворяло условию:

$$\forall A_j(x_j, y_j, z_j), (j = 1, 2, \dots, m): x_j \geq 0, y_j \geq 0, z_j \geq 0, \quad (2.131)$$

а первоначальная точка установки РП $P_y(x_y, y_y, z_y)$ удовлетворяло условию:

$$P_y(x_y, y_y, z_y): x_y \geq 0, y_y \geq 0, z_y \geq 0. \quad (2.132)$$

При выполнении условия (2.131) (2.132) все требуемые точки позиционирования и первоначальная точка установки РП расположены в первом квадранте выбранной системы координат $OXYZ$.

Для определения такого взаимного расположения РП относительно требуемых точек позиционирования необходимо рассмотреть все возможные варианты ориентации РП.

Проиллюстрируем вышеизложенное для случая цилиндрического вида РП РП (рисунок 2.20).

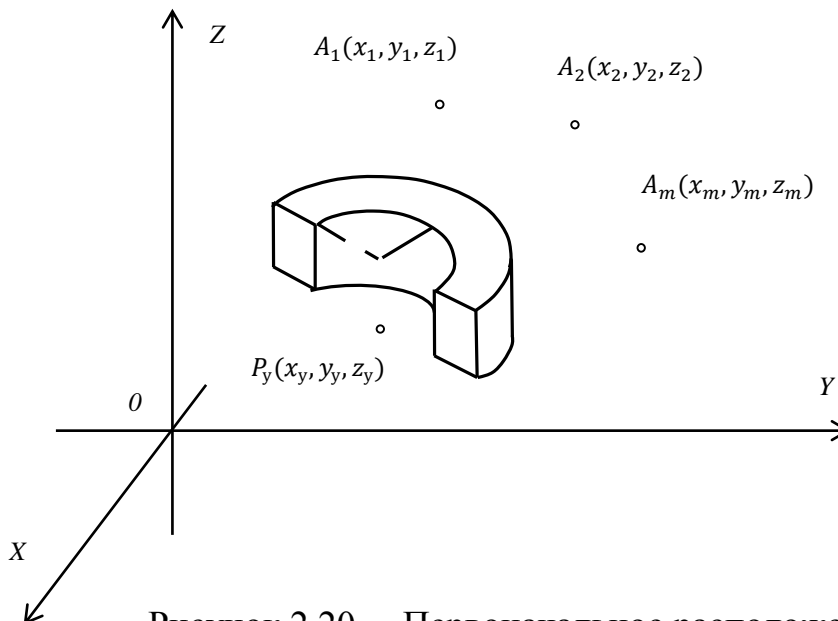


Рисунок 2.20. – Первоначальное расположение РП РП относительно требуемых точек позиционирования.

РП каждого РП формализовано моделируется в виде отдельной процедуры. Формализованное описание РП РП привязано к началу координат, хотя первоначальное расположение РП РП привязано к точке $P_y(x_y, y_y, z_y)$. По этой причине необходимо все точки пересчитать привязкой к процедуре описания РП РП. Для этого каждая точка позиционирования в новой системе координат будет равна:

$$x'_j = x_j - x_y, y'_j = y_j - y_y, z'_j = z_j - z_y. \quad (2.133)$$

В этом случае расположение РП РП относительно требуемых точек позиционирования изменится и будет таким как показано на рисунке 2.21.

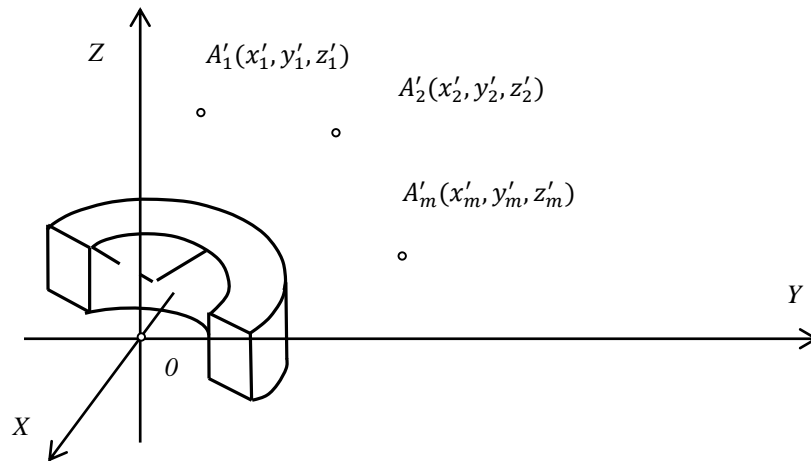


Рисунок 2.21. – Расположение ПР относительно требуемых точек позиционирования в системе координат связанных с формализованным описанием РП.

Для реализации данного перехода от одной системы координат к другой разработана процедура СКПР, блок – схема которой представлена на рисунке 2.22.

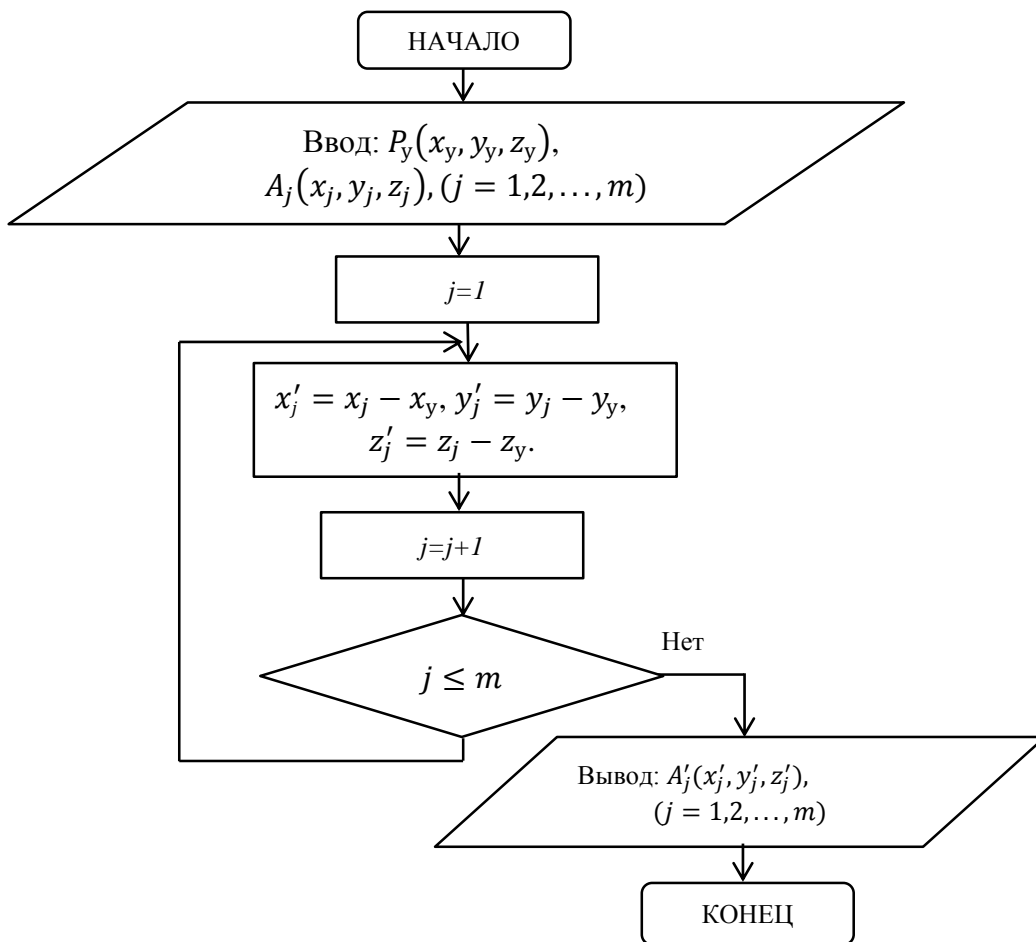


Рисунок 2.22. – Блок-схема процедуры СКПР.

Входными данными будут координаты точки установки ПР $P_y(x_y, y_y, z_y)$

и координаты требуемых точек позиционирования схвата $A_j(x_j, y_j, z_j)$, ($j = 1, 2, \dots, m$) . Далее в цикле по формуле (2.133) определяются новые координаты требуемых точек позиционирования $A'_j(x'_j, y'_j, z'_j)$, ($j = 1, 2, \dots, m$) схвата ПР, которые и являются выходными данными данной процедуры.

При выборе ПР по РП, необходимо рассматривать различные взаимные расположения ПР относительно технологического и вспомогательного оборудования [7]. Такая постановка задачи приводит к более полному учету особенностей РП ПР.

Для реализации данного изменения взаимного расположения РП ПР относительно требуемых точек позиционирования необходимо изменять все время содержимое процедур описания РП. Этого решения данной задачи трудно реализуемо. Поэтому предлагается ПР оставлять неподвижным, а вращать в системе координат связанных с РП требуемые точки позиционирования $A'_j(x'_j, y'_j, z'_j)$, ($j = 1, 2, \dots, m$).

Зададим период дискретизации ν кратный 360° . Тогда за один шаг угол поворота точек позиционирования будет равен $\alpha = \frac{360^\circ}{\nu}$. Следовательно, новые координаты будут равны:

$$\begin{aligned} x''_j &= \sqrt{x'^2_j + y'^2_j} \cdot \cos\left(\arccos\frac{x'_j}{\sqrt{x'^2_j + y'^2_j}} + \alpha\right), \\ y''_j &= \sqrt{x'^2_j + y'^2_j} \cdot \sin\left(\arccos\frac{x'_j}{\sqrt{x'^2_j + y'^2_j}} + \alpha\right), z''_j = z'_j. \end{aligned} \quad (2.134)$$

Для реализации данного преобразования координат разработана процедура КТСР, блок – схема которой представлена на рисунке 2.23. Входными данными будут значения координат точек $A'_j(x'_j, y'_j, z'_j)$, ($j = 1, 2, \dots, m$), величина угла α . Далее осуществляется перерасчет координат требуемых точек позиционирования по формуле (2.134). Полученные новые координаты $A''_j(x''_j, y''_j, z''_j)$, ($j = 1, 2, \dots, m$) будут выходными данными рассматриваемой процедуры.

Так как начало координат перенесено в точку установки ПР, то направление поиска определим в виде среднего арифметического углов наклона каждой требуемой точки позиционирования $A'_j(x'_j, y'_j, z'_j)$, ($j = 1, 2, \dots, m$). Значение угла наклона j – той точки позиционирования равно

$$\varphi_j = \arccos\frac{x'_j}{\sqrt{x'^2_j + y'^2_j}}, j = \overline{1, m}, \quad (2.135)$$

Если значение угла $\varphi_j > 180^\circ$, то значение его принимается равным $\varphi_j = 0^\circ$. Это связано с тем обстоятельством, что необходимо РП ПР охватить все требуемые точки позиционирования, в том числе и те которые расположены относительно точки установки ПР, на более больших расстояниях.

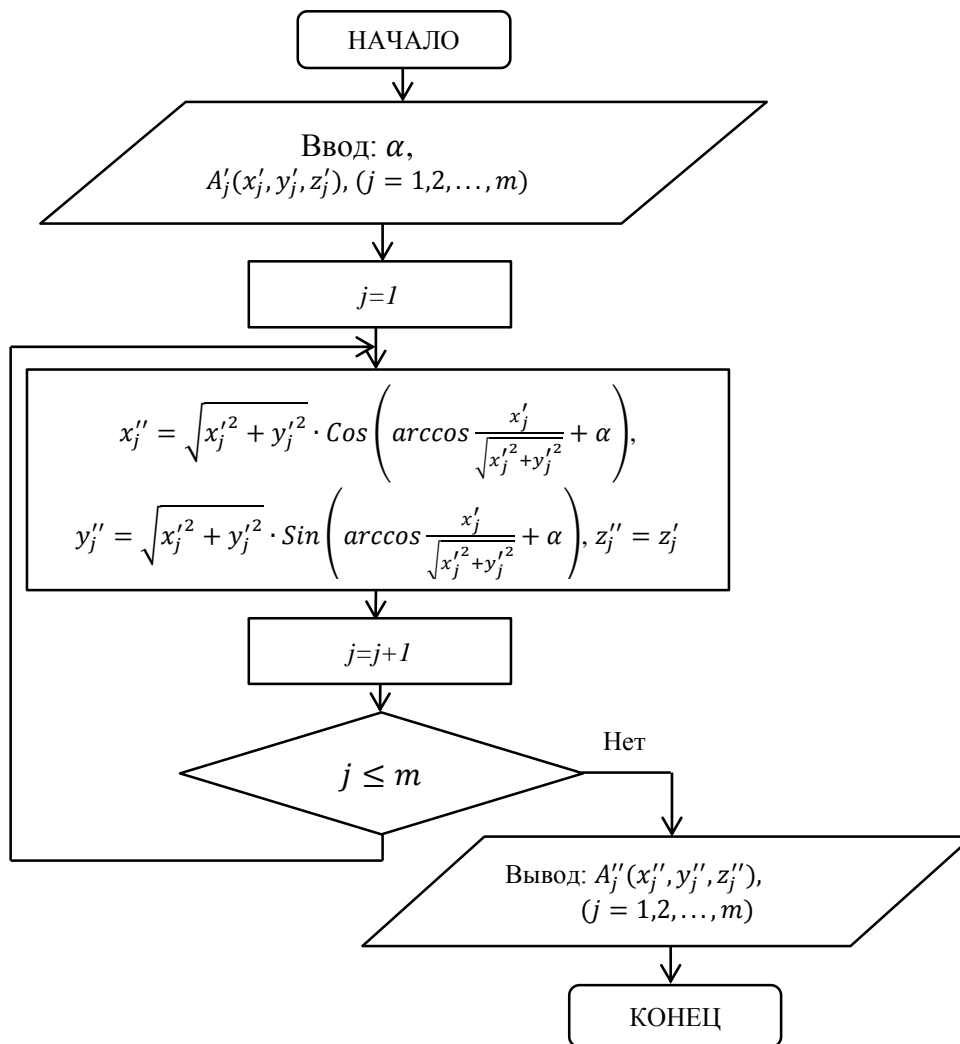


Рисунок 2.23. – Блок-схема процедуры КТСПР.

Угол направления поиска решения данной задачи с учетом (2.135) и условия что угол при превышении величины $\varphi_j > 180^\circ$, то $\varphi_j = 0^\circ$, будет равен:

$$\varphi = \frac{\sum_{j=1}^m \varphi_j}{m}. \quad (2.136)$$

Для определения угла направления поиска решения, разработана процедура ОНПР, блок-схема которой показана на рисунке 2.24.

Входными параметрами процедуры ОНПР являются координаты требуемых точек позиционирования $A'_j(x'_j, y'_j, z'_j)$, $(j = 1, 2, \dots, m)$. Используя процедуру ОНПР, на каждом шаге вычисляются значения φ_j , $j = \overline{1, m}$. Далее по вычисленным значениям φ_j (2.135) и с учетом условия, что угол при превышении величины $\varphi_j > 180^\circ$, то $\varphi_j = 0^\circ$, определяется φ , угол задающий направление поиска решения данной задачи. Значение угла φ является параметром вывода процедуры ОНПР.

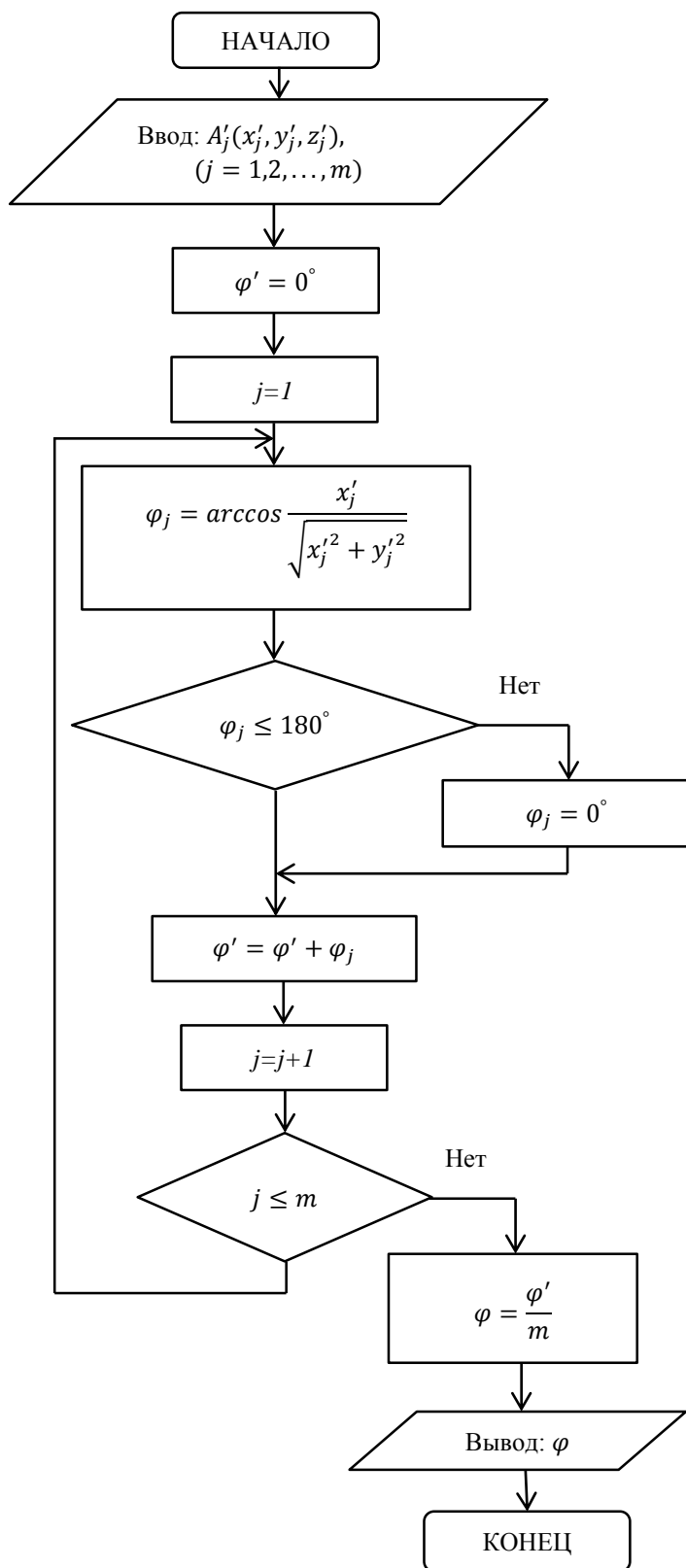


Рисунок 2.24. – Блок-схема процедуры ОНПР.

После того как выбрано направление поиска решения задачи необходимо осуществить перемещение ПР с заданным шагом Δ . При этом изменятся координаты точки установки ПР $P_y(x_y, y_y, z_y)$, которые зависят от величины шага поиска решения Δ и угла поиска решения φ и определяются при помощи выражения:

$$x_y = \Delta \cos \varphi, y_y = \Delta \sin \varphi, z_y = 0. \quad (2.137)$$

В выражении (2.137) значение $z_y = 0$, по причине того обстоятельства, что ПР устанавливается на полу производственного помещения.

Для реализации перемещения ПР в новую точку установки разработана процедура ОУПР, блок – схема которой показана на рисунке 2.25.

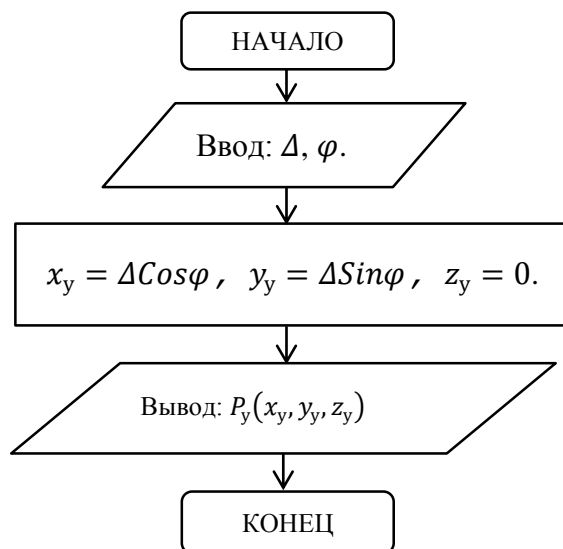


Рисунок 2.25. – Блок-схема процедуры ОУПР.

Входными параметрами процедуры ОУПР будут величины шага Δ и угла φ поиска решения задачи. Далее осуществляется расчет координат новой точки установки ПР по формуле (2.137). Выходными данными данной процедуры будут значение координат точки установки ПР $P_y(x_y, y_y, z_y)$.

Перемещение ПР относительно требуемых точек позиционирования осуществляется до тех пор пока не будет охвачена самая дальняя точка позиционирования $A_d(x_d, y_d, z_d)$. Координаты этой точки с учетом выполнения процедуры СКПР определяются следующим образом, вычисляются все расстояния l_j :

$$l_j = \sqrt{x_j'^2 + y_j'^2 + z_j'^2}.$$

Определяется максимальное значение l_j , которое соответствует точке $A_d(x_d, y_d, z_d)$:

$$\exists l_d = \max(l_j), j = \overline{1, m} : x_d = x_j, y_d = y_j, z_d = z_j. \quad (2.138)$$

Для реализации выражения (2.138) разработана процедура ВМТП, блок-схема которой приведена на рисунке 2.26.

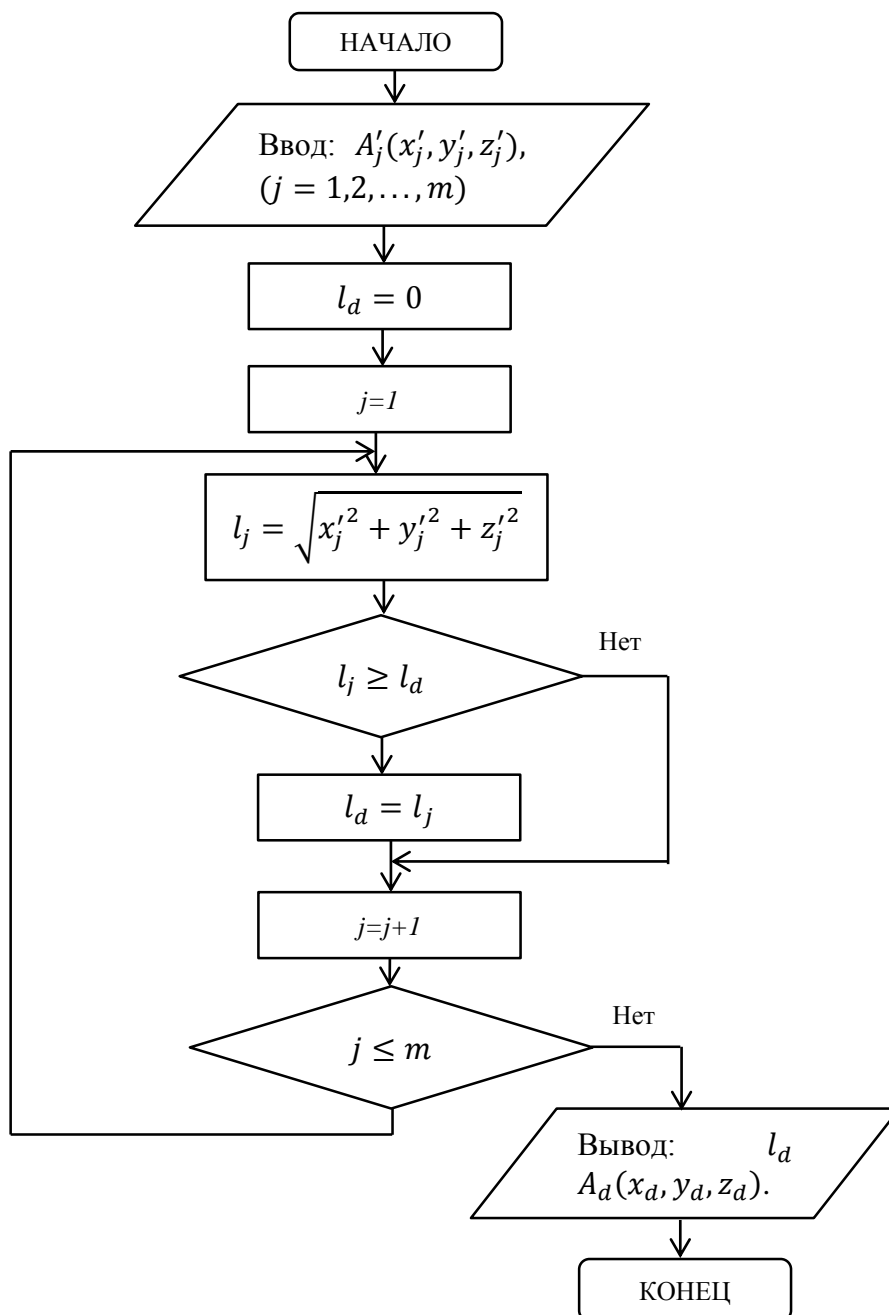


Рисунок 2.26. – Блок-схема процедуры ВМТП.

Входными параметрами процедуры ВМТП являются координаты требуемых точек позиционирования $A'_j(x'_j, y'_j, z'_j)$, $(j = 1, 2, \dots, m)$. В цикле, на каждом шаге вычисляются значения l_j , $j = \overline{1, m}$. Далее по вычисленным значениям l_j используя выражение (2.138) находим значение l_d и координаты наиболее удаленной точки $A_d(x_d, y_d, z_d)$. Эти значения являются параметрами вывода процедуры ВМТП.

Далее проверяется условие охвата РП ПР данной точки $A_d(x_d, y_d, z_d)$. Это осуществляется при помощи процедур РП – i . Если точка охвачена, то осуществляется проверка условий охвата других требуемых точек позиционирования. Если охватываются все требуемые точки позиционирования, то делается вывод о применимости данной модели ПР

для роботизации заданного ТП.

В случае если не полностью охватываются РП ПР требуемые точки позиционирования, то делается вывод о не соответствии данной модели ПР требованиям данного ТП. И рассматривается следующая модель.

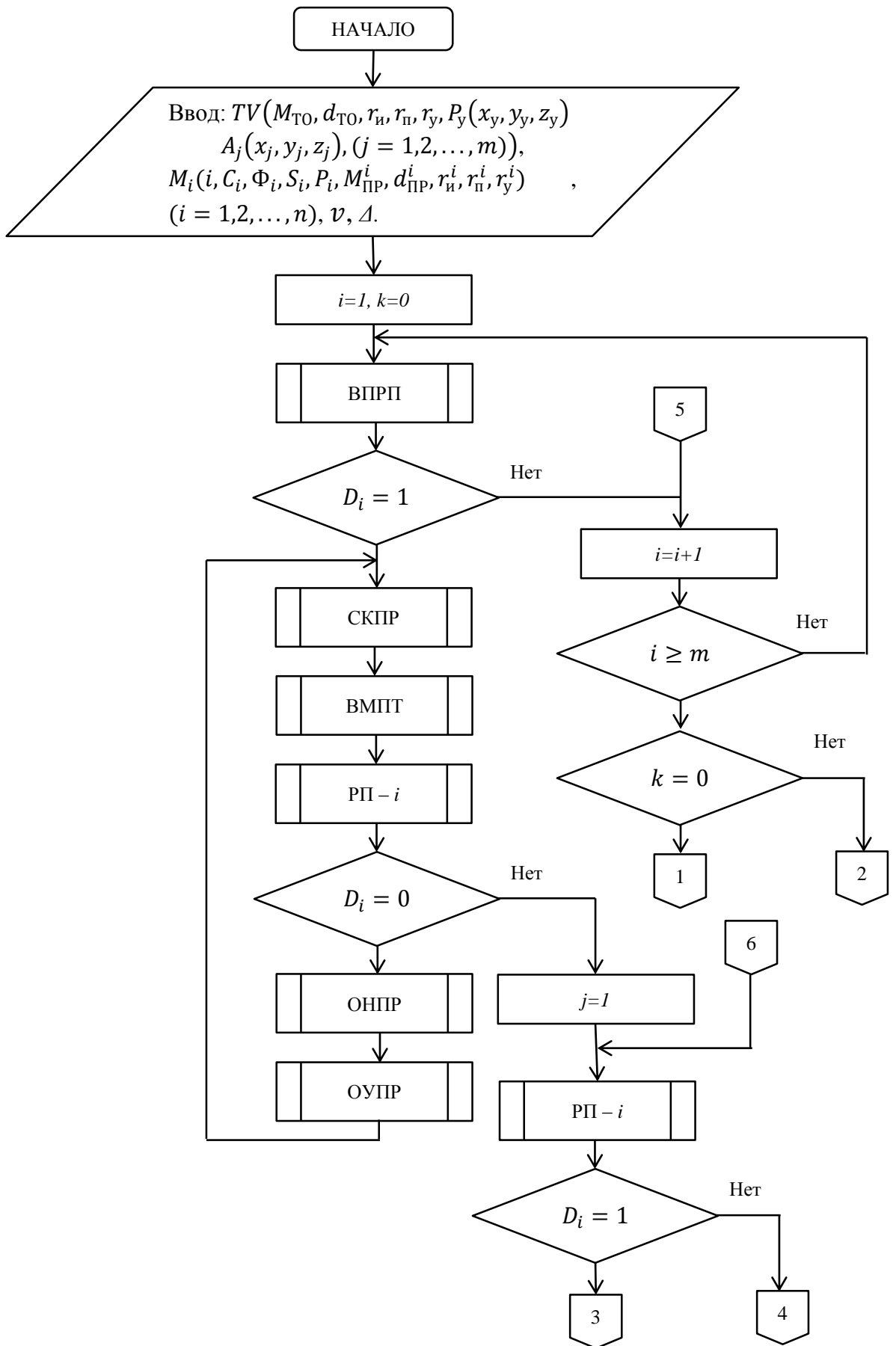
Таким образом отобранные модели ПР анализируются по возможности построения на их основе компоновочной схемы РТК.

Для реализации алгоритма упрощенного выбора модели серийно-выпускаемых ПР разработан алгоритм, блок – схема которого представлена на рисунке 2.27.

Входными данными для решения задачи выбора моделей ПР удовлетворяющих требованиям заданного ТП являются: параметры ТП, которые задаются в виде вектора (2.129), также задаются параметры серийно – выпускаемых ПР, каждая модель задается вектором (2.130). РП каждого ПР представляется в виде процедуры РП – i . Процедуры описания 3 – х степенных ПР, РП которых соответствует цилиндрической, прямоугольной и сферической системам координат приведены в Приложении 2. Таким образом, можно составить процедуру описания РП практически любого ПР.

Далее выбирается первая модель ПР, приравняется нулю число моделей ПР удовлетворяющих требованиям заданного ТП. При помощи процедуры ВПРП осуществляется проверка соответствия численных параметров выбранной модели ПР требованиям заданного ТП. В случае несоответствия численных параметров, выбирается следующая модель ПР. В случае соответствия численных параметров ПР, переходят к следующему этапу, соответствия РП ПР требованиям ТП.

Данная задача заключается в определении такого расположения ПР относительно требуемых точек позиционирования, при котором они все охватываются РП робота. Идея решения этой задачи заключается в нахождении такого положения ПР, при котором РП охватывает наиболее удаленную требуемую точку позиционирования. Для этого вначале с помощью процедуры СКПР осуществляется переход в систему координат связанной с точкой установки ПР. Далее при помощи процедуры ВМТП определяются координаты наиболее удаленной точки позиционирования. Далее при помощи РП – i проверяется условие принадлежности удаленной точки РП ПР. Если данная точка не принадлежит РП ПР, то осуществляется перемещение ПР в направлении среднего угла, связанного со всеми требуемыми точками позиционирования. При помощи процедуры ОНПР определяется средний угол, который берется в качестве направления решения задачи. Далее при помощи процедуры ОУПР определяется новая координата точки установки ПР. Осуществляется переход к процедуре СКПР. Этот цикл повторяется до выполнения условия принадлежности удаленной точки позиционирования РП рассматриваемого ПР.



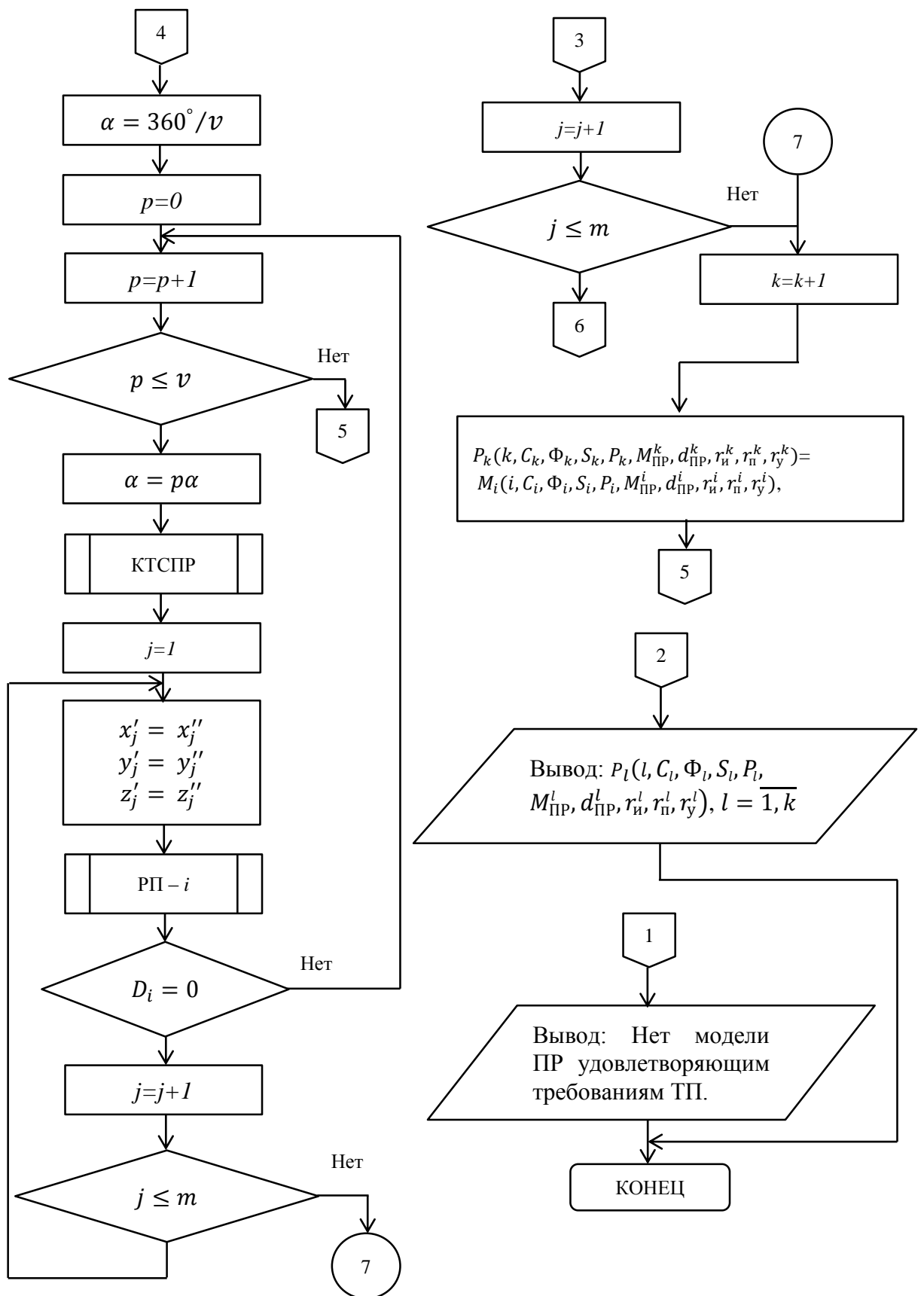


Рисунок 2.27. – Блок-схема алгоритма выбора модели РП для роботизации заданного ТП.

Если выполнилось условие охвата РП РП наиболее удаленной точки

позиционирования, то переходят к процедуре проверки принадлежности всех требуемых точек позиционирования РП ПР. Для этого в цикле начинается проверка принадлежности каждой требуемой точки позиционирования РП ПР. Если выполняется условие, что РП ПР охватывает все требуемые точки позиционирования, то делается вывод о возможности роботизации данного ТП с применением данной модели ПР.

В случае, если не охвачена очередная требуемая точка позиционирования, то переходят к процедуре изменения ориентации РП ПР, путем вращения робота вокруг начала координат, связанных с точкой установки ПР. Для этого задается шаг дискретизации угла поворота. Далее с помощью процедуры КТСР определяются координаты точек позиционирования повернутых вокруг оси, связанной с точкой установки ПР. В цикле осуществляется проверка принадлежности требуемых точек позиционирования РП ПР.

Если осуществлен полный поворот вокруг оси ПР и условие принадлежности всех требуемых точек позиционирования РП ПР не выполнено, то делается вывод о не применимости данной модели ПР для роботизации рассматриваемого ТП.

Если же при каком – то угле поворота все требуемые точки будут охвачены РП ПР, то данная модель робота отбирается для роботизации ТП. Осуществляется переход к следующей модели ПР. Как будет осуществлен анализ всех ПР, то процесс завершается. На выходе работы алгоритма выбора моделей ПР, получим список роботов удовлетворяющих требованиям ТП. Может оказаться что ни одна модель ПР не удовлетворяет требованиям ТП, то тогда делается вывод об этой ситуации.

В результате работы алгоритма, выводятся параметры серийно-выпускаемых ПР, удовлетворяющим требованиям роботизируемого производственного процесса. Если введен в рассмотрение функционал вида (2), то его значение вычисляется для каждой выбранной модели ПР, Далее сравнивая значения вычисленных функционалов, можно выбрать наиболее приемлемую модель или несколько моделей ПР.

2.5 Выбор моделей промышленных роботов для роботизации технологических операций производства товарного свинца, цинка и магния

С использованием разработанного алгоритма произведем выбор модели ПР для роботизации ТО снятия оксидной пленки с поверхности расплавов свинца и цинка залитых в неподвижные изложницы КРМ, переброса струи магниевого расплава между стыками движущихся изложниц ЛК и снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава залитого в движущиеся изложницы ЛК.

ТО снятия оксидной пленки с поверхности расплава свинца и цинка производится с неподвижных изложниц КРМ. Для выполнения этой операции можно применить ПР (рисунок 2.28), который встречным

движением лопатки снимает оксидную пленку с поверхности расплава. Манипулятор, имеющий степень подвижности линейного перемещения 1, при помощи подвижной лопатки 2, нагребает оксидную пленку на неподвижную лопатку 3, закрепленную на корпусе манипулятора.

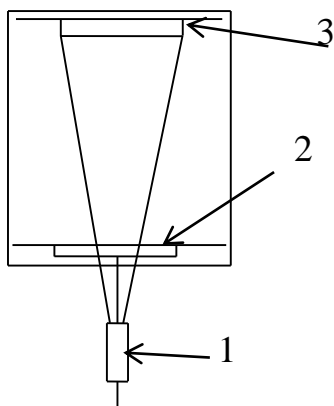


Рисунок 2.28 – Схема съема оксидной пленки с поверхности неподвижной изложницы карусельной разливочной машины

Таким образом, снятая оксидная пленка далее вытряхивается в специальную тару.

ПР для выполнения ТО снятия оксидной пленки с поверхности расплавов свинца и цинка должен обладать грузоподъемностью 10 кг., погрешностью позиционирования 0,001 м., должен иметь как минимум 3 степени подвижности, СПУ должна быть позиционной, что предопределяет применение электропривода, так как применение гидропривода не целесообразно из-за наличия высоких температур. Особо следует остановиться на виде исполнения основных узлов ПР, они должны быть пылезащищенными, способными выдерживать высокие температуры и влияние агрессивной среды с высоким содержанием паров сернистого ангидрида. Эти специфические требования предполагают применение ПР специального назначения, которые способны функционировать в данной производственной среде.

Для реализации подобного движения лопаток, возможно применение ПР имеющих РП в виде кинематической схемы 1, 2, 6, 8, 16, 18 приведенные в таблице приложения 1.

Рассмотрим ТО переброса струи металла между стыками движущихся изложниц ЛК (рисунок 2.29). Данная ТО заключается в перестановке двухскатной лопатки (рисунок 2.29 б) с одного стыка на следующий стык (рисунок 2.29а).

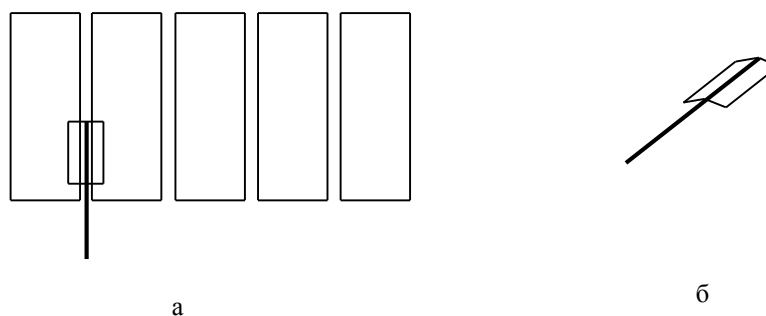


Рисунок 2.29 – Схема переброса струи между стыками изложниц

ПР для выполнения ТО снятия оксидной пленки с поверхности расплавов свинца и цинка должен обладать грузоподъемностью 3 кг., погрешностью позиционирования 0,001 м., должен иметь как минимум 3 степени подвижности, СПУ должна быть цикловой, что предопределяет применение пневматического привода. Особо следует остановиться на виде исполнения основных узлов ПР, они должны быть пылезащищенными, способными выдерживать высокие температуры и влияние агрессивной среды с высоким содержанием паров хлора. Эти специфические требования предполагают применение ПР специального назначения, которые способны функционировать в данной производственной среде.

Для выполнения таких манипуляций с двухскатным скребком применимы ПР имеющие кинематические структуры 1, 2, 4, 6, 8, 9, 16, 17, 18 приведенные в таблице приложения 1.

ТО снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава, залитого в движущиеся изложницы ЛК. ТО выполняется ПР как показано на рисунке 2.28.

ПР для выполнения ТО снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава должен обладать грузоподъемностью 7 кг., погрешностью позиционирования 0,001 м., должен иметь как минимум 3 степени подвижности, СПУ должна быть контурной, что предопределяет применение электропривода, так как применение гидропривода не целесообразно из-за наличия высоких температур. Особо следует остановиться на виде исполнения основных узлов ПР, они должны быть пылезащищенными, способными выдерживать высокие температуры и влияние агрессивной среды с высоким содержанием паров хлора. Эти специфические требования предполагают применение ПР специального назначения, которые способны функционировать в данной производственной среде.

Для выполнения манипуляций по снятию оксидной пленки с поверхности магниевого расплава, залитого в движущиеся изложницы ЛК применим ПР имеющий кинематическую структуру 1 приведенную в таблице приложения 1, или же роботы имеющие 4 степени подвижности. Например ПР, имеющий кинематическую структуру, представленную на рисунке 2.30.

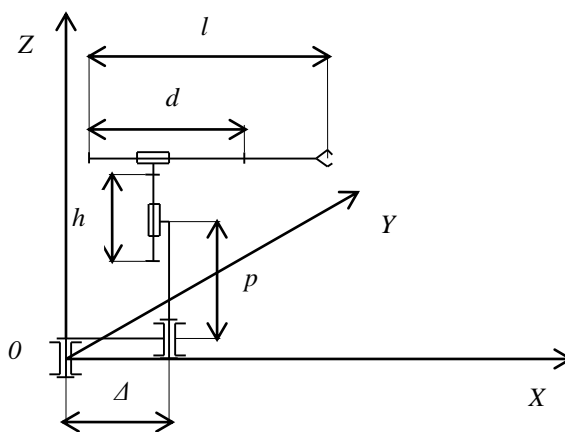


Рисунок 2.30 – Кинематическая структура 4-х степенного ПР

ПР имеет 4 степени подвижности. Первая степень подвижности представляет собой вращение вокруг оси OZ . Вторая степень подвижности вращение вокруг прямой параллельной оси OZ , смещенной на расстояние равное Δ . За счет данного смещения можно сопровождать движение конвейерной ленты ЛК, как показано на рисунке 2.31. Для этого предлагается ПР должен иметь первые две степени подвижности, которые обеспечат сопровождение движения изложниц ЛК.

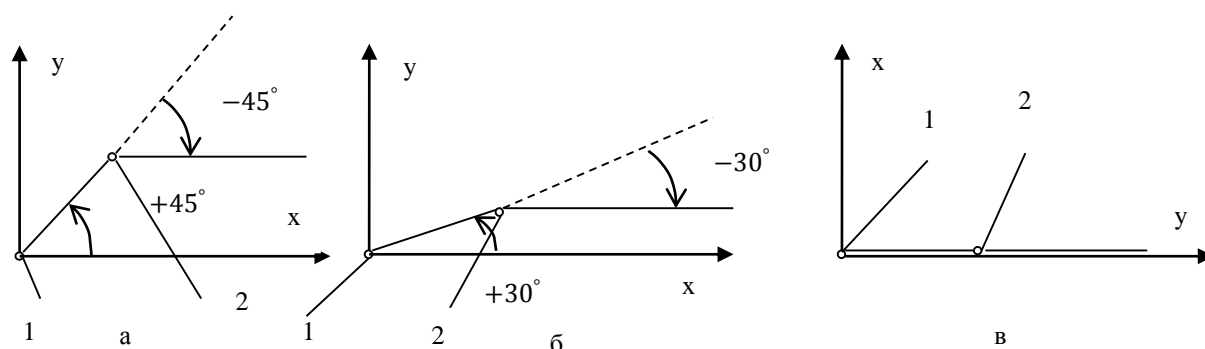


Рисунок 2.31 – Схема степеней подвижности ПР для компенсации движения изложниц ЛК

За счет вращения по 1 и 2 степеням подвижности обеспечивается сопровождение движущейся изложницы ЛК. Они поворачиваются следующим образом, одна по часовой, а другая против часовой стрелки на одинаковые углы, со скоростями, обеспечивающими смещение лопаток параллельно оси OY . Например, пусть первоначальный угол составляет 45 градусов (рисунок 2.31а). Далее осуществляется поворот по 1 и 2 степени подвижности на одинаковые углы, таким образом чтобы лопатки все время располагались параллельно оси OY . Промежуточное положение, соответствующее повороту по обеим степеням подвижности на 30 градусов показано на рисунке 2.31б. Конечное положение 1 и 2 степеней подвижности показано на рисунке 2.31в.

Третья степень подвижности, линейное перемещение вдоль прямой,

параллельной оси OZ , смещенной на расстояние равное Δ , на величину h . Четвертая степень подвижности представляет собой линейное перемещение вдоль прямой параллельной оси OX , смещенной на расстояние $p+h$.

Для выполнения ТО можно также применить специализированные манипуляторы, которые предложены в работе [74]. Необходимо отметить и важность контроля температуры изложниц, которую можно постоянно контролировать при помощи манипулятора для измерения температур, описанную в работе [75, 76].

Применение ПР для роботизации ТО производств свинца, цинка и магния позволит сократить долю применяемого ручного труда, имеющего монотонный однообразный характер, выполняемого во вредных для здоровья работающих условиях.

ВЫВОДЫ

1. Разработана постановка задачи выбора ПР в виде задачи оптимизации с функционалом (2.2) и ограничением представляющим собой формализованное описание РТК в виде логических выражений R-функций (2.1).

2. Предложена процедура описания РП ПР с применением R-функций (2.11).

3. С применением предложенной процедуры описания РП, описаны в виде R-функций, РП трех степенных ПР, работающих в прямоугольной, цилиндрической и сферической системах координат.

4. Разработаны блок-схемы алгоритмов формализованного описания РП трех степенных ПР.

5. Поставлена задача выбора модели серийно-выпускаемого робота при роботизации производственных процессов, в виде решения логического выражения (2.8), (2.129).

6. Разработана блок – схема алгоритма предварительного (упрощенного) выбора моделей серийно-выпускаемых роботов, для роботизации заданного производственного процесса.

3. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ И АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ РОБОТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ АППРОКСИМАЦИИ ЕЁ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ЦИЛИНДРАМИ

При роботизации производственных процессов, одной из задач является задача построения компоновочной схемы роботизированного технологического комплекса (РТК). Компоновочная схема (КС) представляет собой схему размещения элементов РТК на производственной площади [18, 71, 72]. При этом должно быть исключено взаимное столкновение технологического, вспомогательного оборудования и промышленного робота (ПР) между собой, а также все требуемые точки позиционирования, заданные траектории движения схвата или рабочего органа должны принадлежать рабочему пространству робота, должны быть предусмотрены места подвода коммуникаций, необходимо также учесть удобство технического обслуживания оборудования и робота, контроля работы комплекса с пульта оператора РТК [35, 36].

В качестве основных критериев оптимизации в задаче размещения элементов РТК на производственном участке используется суммарная площадь. Задача построения КС РТК может быть решена как в аналитической форме, так и с применением графических методов.

При применении аналитических методов решения задачи построения КС РТК, формализованная модель РТК может быть представлена в виде графа [34], или же элементы РТК могут рассматриваться в виде геометрических объектов [32, 44]. При этом в результате решения поставленной задачи построения КС РТК, получается решение в виде набора данных определяющих взаимное расположение элементов РТК.

Применение графических методов построения КС РТК, связано с применением диалогового режима решения, при котором разработчик может менять условия задачи, корректировать полученные результаты на экране дисплея компьютера [35, 36]. При описании элементов РТК, как геометрических объектов можно применить два подхода. Первый подход основан на методах точного аналитического описания кривых и поверхностей. Второй подход основан на использовании приближенных методов интерполяции или аппроксимации. При графическом моделировании КС, геометрический объект можно представить в виде проволочной, полигональной, объемной моделей. Эти модели реализуются двумя способами, первый в виде информационных массивов (структур данных), которые полностью определяют все элементы геометрического объекта в пространстве, второй в виде набора правил, с помощью которых генерируются характеристики любого элемента геометрического объекта [44].

В случае, когда конфигурация рабочего пространства роботизируемого производственного процесса имеет сложную форму, или практической

неразрешимости описания некоторых деталей поверхностей, наиболее приемлемым оказываются методы, основанные на применении аналитических моделей. Применение аналитических моделей, данного подхода на каждом очередном шаге построения КС для наглядности и визуального контроля можно совмещать с графической моделью и при необходимости внести коррекцию в процедуру построения КС РТК.

От качества выполнения этапа построения КС зависит производительность работы всего комплекса, так как неудачное взаимное расположение робота, технологического и вспомогательного оборудования увеличивает время обслуживания оборудования роботом, ухудшает динамические параметры робота, приводит к быстрой утомляемости оператора РТК, контролирующего процесс функционирования, вследствие увеличения ситуаций, требующих повышенного внимания [29].

Применение известных методов, алгоритмов построения КС [44] на основе графовых моделей, методов графического моделирования [31] в случае роботизации производственных процессов имеющих сложную конфигурацию элементов РТК может не привести к желаемому результату. Для решения задачи построения КС РТК в этом случае можно применить возможности математического аппарата R -функций, позволяющем решать задачи методами аналитического моделирования [35, 36], с дальнейшим контролем методами графического моделирования.

Дальнейшая процедура заключается в том что для выбранного варианта робота и построенного варианта КС РТК необходимо решить задачу синтеза программных траекторий по степеням подвижности ПР. В последнее время для решения задачи синтеза программных траекторий находит широкое применение метод винтов. В этом методе применяются матрицы с дуальными элементами [77].

Использование некоторых допущений, относящихся к геометрии кинематической цепи ПР, которое в некоторых случаях значительно упрощает процедуру вывода соотношений для решения задачи синтеза программных траекторий по степеням подвижности робота [78, 79, 80]. В геометрическом методе рассматриваемая задача решается для трех степеней подвижности методами жесткой оптимизации [81]. При применении подхода возникают вырожденные решения, для устранения которых предлагаются различные эвристические методы и алгоритмы [82]. Имеются работы, в которых предлагается применять сочетание геометрических и матричных методов решения задачи [83].

Одним из методов решения задачи синтеза программных траекторий является алгебраический метод [79]. Возникающие при этом сингулярности, устраняются эвристическими алгоритмами [84], или методами компактного, квадратичного программирования [85].

В работе [86] для решения задачи синтеза программных траекторий применяется метод градиента. Суть данного метода заключается в сведении решаемой задачи, к задаче о рассогласовании между векторами обобщенных координат, описывающих заданное и текущее положение КЦ ПР.

Применяется для решения рассматриваемой задачи и метод Ньютона, который основан на представлении уравнений кинематики в линейном приближении [87].

В работах [88, 89] задача синтеза программных траекторий по степеням подвижности ПР сводится к двух точечной граничной вариационной задаче. С применением относительных весовых коэффициентов строится целевая функция, которая учитывает плавность движения по траектории и точность позиционирования схвата. Применение методов оптимизации для решения данной задачи с функционалом минимума энергетических затрат и с учетом ограниченных возможностей приводов рассмотрено в работах [90, 91]. В работе [92] предлагается применение принципов и методов кватернионного анализа для целей синтеза протяженных траекторий.

В частности, в работе [93], разработан новый аналитический подход, названный методом модификационного сдвига. Он состоит в последовательной модификации величины сдвига исполнительного механизма с целью построения в замкнутом виде уравнений движений по степеням подвижности робота. Изменение относительных приоритетов, модификаций величины сдвига звеньев исполнительного механизма предложено в работе [94].

Для решения задачи синтеза программных траекторий по степеням подвижности ПР нашли также применение методики принятия решений в условиях неопределенности, применения методов на основе теории нейронных сетей [91, 95], эвристические алгоритмы анализа ситуаций [96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103]. Для решения данной задачи нашли применение и графические методы визуального моделирования [104, 105, 106].

Также методом решения задачи синтеза программных траекторий по степеням подвижности ПР является его решение в конфигурационном пространстве [78, 79]. В работе [107] выведены общие свойства преобразований конфигурационного пространства, разработана спецификация промежуточной системы координат. Основой разработки является определение функциональных блоков, которые легко преобразуются из РП в конфигурационное пространство.

Одним из подходов [108, 109] применения перехода в конфигурационное пространство является применение метода, при котором это пространство разбивается на два несвязанных подпространства: одно – запретное, второе – свободное. Решение задачи синтеза программных траекторий по степеням подвижности ПР ищется в свободном подпространстве. В работе [110] для образования конфигурационного применяются способы линейного программирования, а теории графов используется для определения последовательности свободных от столкновений конфигураций. Используя анализ специфических концепций анизотропии и монотонности конфигурационного пространства можно выбрать наиболее оптимальную криволинейную траекторию обхода препятствий [111].

Для решения задачи синтеза программных траекторий по степеням подвижности ПР также используется подход основанный на применении

потенциальных функций [112, 113, 114]. Суть данного метода заключается в построении потенциальных функций без явно выраженных локальных минимумов при формировании траектории движения схвата с гарантированным достижением цели. Потенциальная функция подобно электростатическому потенциалу приписывает каждому препятствию потенциал, тогда топологическая структура свободного пространства выводится в виде значений минимального потенциала. В работе [115] предлагается элементы препятствий группировать в объектные таблицы, которые содержат информацию о препятствиях и о соседних геометрических объектах.

Имеется целая группа работ, где задача синтеза программных траекторий по степеням подвижности ПР решена для ряда практических приложений, конкретных кинематических структур [116, 117, 118, 119, 120].

Для решения задачи синтеза программных траекторий по степеням подвижности предложены методы с применением математического аппарата R-функций [121 - 126]. С применением математического аппарата R-функций можно описать РП, препятствия, ПР как геометрические объекты. Это позволяет решать задачи аналитическим методом, что значительно повышает точность решения, но при этом эти методы имеют меньшую наглядность по сравнению с методами графического моделирования.

3.1 Формализованное описание процедуры построения компоновочной схемы роботизированного технологического комплекса

Для выполнения каждой i -той технологической операции, связанной с манипуляцией схватом, рабочим органом или иной технологической оснасткой необходимо кроме основного технологического оборудования еще дополнительные вспомогательные оборудования которые, необходимо для адаптации работа для выполнения данной технологической операции. Каждую единицу технологического и вспомогательного оборудования, ПР представим в виде геометрического объекта, который можно описать с применением математического аппарата R-функций.

Элементы РТК, ПР, рабочее пространство (РП) работа, технологическое и вспомогательное оборудования (ТВО), представим в виде геометрических объектов. Каждый геометрический объект представляет собой замкнутую геометрическую пространственную фигуру. В этом случае, геометрический объект можно описать в виде следующей логической функции [68]:

$$F_{\text{го}}(D_k(x, y, z) \geq 0) = 1, \quad (3.1)$$

где $D_k(x, y, z) \geq 0$, ($k=1, 2, \dots, r$), k – тая часть пространства, ограниченная элементарной поверхностью, описывающейся простейшим неравенством, задающим или аппроксимирующим внешнюю границу геометрического объекта,

r – число элементарных поверхностей, ограничивающих геометрический объект.

Логическое выражение (3.1) можно получить следующим образом:

1) выявляются элементарные поверхности, описывающие или аппроксимирующие границы геометрического объекта. Сюда входят также дополнительные вспомогательные поверхности, предназначенные для логического формирования функции, описывающей геометрический объект. Эти поверхности можно задать элементарными неравенствами вида $D_k(x, y, z) \geq 0$;

2) составляется Булева функция, которая логически формируется на основе геометрического образа, а также граничных и вспомогательных поверхностей:

$$D_1 L D_2 L \dots L D_n = 1, \quad (3.2)$$

где n – количество поверхностей, аппроксимирующих границу геометрического объекта,

L – знак логической операции (конъюнкции, дизъюнкции или отрицания),

D_i , ($i = 1, 2, \dots, n$) – логическая переменная, определяемая следующим выражением:

$$D_i = \begin{cases} 1, & \text{если } D_i(x, y, z) \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

3) на основе полученной Булевой функции (3.2) строится R – функция, описывающая заданный геометрический объект:

$$(D_1(x, y, z) \geq 0) L^r (D_2(x, y, z) \geq 0) L^r \dots L^r (D_n(x, y, z) \geq 0) = 1, \quad (3.3)$$

где L^r – знак логической операции R – конъюнкции, R – дизъюнкции или R – отрицания.

Таким образом, можно описать достаточно сложные геометрические объекты в виде логических выражений (3).

Опишем технологическое оборудование как геометрический объект (3.3) в виде логического выражения:

$$(D_1^{TO}(x, y, z) \geq 0) L^r (D_2^{TO}(x, y, z) \geq 0) L^r \dots L^r (D_n^{TO}(x, y, z) \geq 0) = 1, \quad (3.4)$$

где $D_i^{TO}(x, y, z) \geq 0$, ($i=1, 2, \dots, n$) – i - тое неравенство, описывающее элементарную поверхность, аппроксимирующую границу технологического оборудования как геометрического объекта,

n – количество элементарных поверхностей.

Опишем вспомогательное оборудование, как геометрический объект (3.3) в виде логического выражения:

$$(D_1^{BO}(x, y, z) \geq 0) L^r (D_2^{BO}(x, y, z) \geq 0) L^r \dots L^r (D_m^{BO}(x, y, z) \geq 0) = 1, \quad (3.5)$$

где $D_i^{BO}(x, y, z) \geq 0$, ($i=1, 2, \dots, m$) – i - тое неравенство, описывающее элементарную поверхность, аппроксимирующую границу вспомогательного оборудования как геометрического объекта,

m – количество элементарных поверхностей.

Опишем ПР, как геометрический объект (3.3), в виде логического выражения:

$$(D_1^{\text{пп}}(x, y, z) \geq 0)L^r (D_2^{\text{пп}}(x, y, z) \geq 0)L^r \dots L^r (D_p^{\text{пп}}(x, y, z) \geq 0) = 1 \quad , \quad (3.6)$$

где $D_i^{\text{пп}}(x, y, z) \geq 0$, $(i=1,2,\dots,p)$ – i - тое неравенство, описывающее элементарную поверхность, аппроксимирующую границу ПР как геометрического объекта,

p – количество элементарных поверхностей.

Опишем дополнительные пространства, необходимые для обслуживания ТВО и робота (3.3), в виде логического выражения:

$$(D_1^{\text{дп}}(x, y, z) \geq 0)L^r (D_2^{\text{дп}}(x, y, z) \geq 0)L^r \dots L^r (D_s^{\text{дп}}(x, y, z) \geq 0) = 1 \quad , \quad (3.7)$$

где $D_i^{\text{дп}}(x, y, z) \geq 0$, $(i=1,2,\dots,s)$ – i - тое неравенство, описывающее элементарную поверхность, аппроксимирующую границу дополнительного пространства как геометрического объекта,

s – количество элементарных поверхностей.

Условие взаимного не столкновения элементов РТК можно заменить условием взаимного не пересечения геометрических объектов описывающих ТВО, дополнительных поверхностей и ПР. На основе учета (3.4) – (3.7), данное условие можно представить в виде следующего логического выражения [127]:

$$\begin{aligned} & ((D_1^{\text{то}}(x, y, z) \geq 0)L^r (D_2^{\text{то}}(x, y, z) \geq 0)L^r \dots L^r (D_n^{\text{то}}(x, y, z) \geq 0) = 1)A_1 \\ & ((D_1^{\text{бо}}(x, y, z) \geq 0)L^r (D_2^{\text{бо}}(x, y, z) \geq 0)L^r \dots L^r (D_m^{\text{бо}}(x, y, z) \geq 0) = 1)A_1 \\ & ((D_1^{\text{пп}}(x, y, z) \geq 0)L^r (D_2^{\text{пп}}(x, y, z) \geq 0)L^r \dots L^r (D_p^{\text{пп}}(x, y, z) \geq 0) = 1,)A_1 \\ & ((D_1^{\text{дп}}(x, y, z) \geq 0)L^r (D_2^{\text{дп}}(x, y, z) \geq 0)L^r \dots L^r (D_s^{\text{дп}}(x, y, z) \geq 0) = 1) = 0, \end{aligned} \quad (3.8)$$

Условие принадлежности всех требуемых точек позиционирования, заданных траектории движения схвата или рабочего органа РП ПР запишем в виде:

$$\forall A_j(x_j, y_j, z_j), j = 1, 2, \dots, m, \quad (D_1(x, y, z) \geq 0)L^r (D_2(x, y, z) \geq 0)L^r \dots L^r (D_n(x, y, z) \geq 0) = 1. \quad (3.9)$$

где $D_k(x, y, z) \geq 0$, $(k=1,2,\dots,r)$, k – тая часть пространства, ограниченная элементарной поверхностью, описывающейся простейшим неравенством, задающим или аппроксимирующим границу РП,

r – число элементарных поверхностей.

Эффективность построенного варианта компоновочной схемы можно оценивать занимаемой производственной площадью РТК ($S_{\text{РТК}}$). Тогда в качестве критерия оптимизации, при построении КС РТК можно сформировать целевую функцию вида:

$$S_{\text{РТК}} \rightarrow \min. \quad (3.10)$$

Задачу построения КС РТК представим в виде задачи оптимизации (3.10), при ограничениях (3.8) и (3.9). Разработка алгоритмов построения КС РТК, в данной постановке сложная задача, так как трудно реализовать выполнение условия ограничения (3.8).

Данная задача отличается от задачи оптимального раскроя [8] тем, что имеется дополнительное логическое ограничение вида (3.8). При роботизации производственных процессов следует различать две задачи: роботизация действующих производств и роботизация вновь создаваемых производств [18]. Задача построения КС при роботизации вновь создаваемых производств имеется возможность варьирования различных структур компоновочных схем. При роботизации действующих производств, взаимное расположение ТВО заранее задано, а задача построения КС РТК заключается в максимальной привязке робота к производственному процессу. Далее рассматривается задача построения КС РТК действующих производств. Однако, полученные результаты можно использовать и для построения КС РТК вновь создаваемых производств.

В случае роботизации действующих производств заранее задано размещение ТВО и требуется разместить ПР таким образом, чтобы исключить факты столкновения основания робота с оборудованием и выполнить условие охвата рабочим пространством требуемых точек позиционирования схвата или рабочего органа робота.

3.2 Построение компоновочной схемы роботизированного технологического комплекса при аппроксимации её элементов прямоугольными цилиндрами

Для упрощения задачи аппроксимируем ТВО цилиндрами, расположенными перпендикулярно производственной площади. Тогда проекция каждого цилиндра на производственную площадь будет окружностью радиуса R_i , $i = \overline{1, m}$, где m – количество единиц технологического и вспомогательного оборудования. Аппроксимируем ПР, цилиндром радиуса R_r [127].

К каждой единице ТВО привязаны требуемые точки позиционирования рабочего органа. Взаимное расположение ТВО, определяется заданной технологической цепочкой. Изменение заданного взаимного расположения ТВО, как правило, не допустимо.

Для задания взаимного расположения ТВО, привяжем произвольную систему координат к производственной площади. Расположение каждой единицы ТВО зададим координатами центра цилиндра, точками $A_i(x_i, y_i)$, $i = \overline{1, m}$, где m – количество единиц применяемого оборудования. Расположение ПР, зададим координатами центра цилиндра $A_r(x_r, y_r)$.

К каждой единице ТВО привяжем координаты требуемых точек позиционирования рабочего органа ПР $B_j(x_j, y_j, z_j)$, $j = \overline{1, s}$, где s – количество требуемых точек позиционирования схвата или рабочего органа ПР.

Зададим начальное расположение цилиндра, аппроксимирующего ПР, координатой центра цилиндра точкой $A_r(x_r, y_r)$. Тогда первоначальное расположение ТВО и ПР можно представить в виде рисунка 3.1. На данном

этапе необязательно задавать дополнительные пространства, необходимые для выполнения технического обслуживания элементов РТК и контроля функционирования РТК с пульта оператора, так как здесь рассмотрена лишь приближенная модель компоновочной схемы РТК.

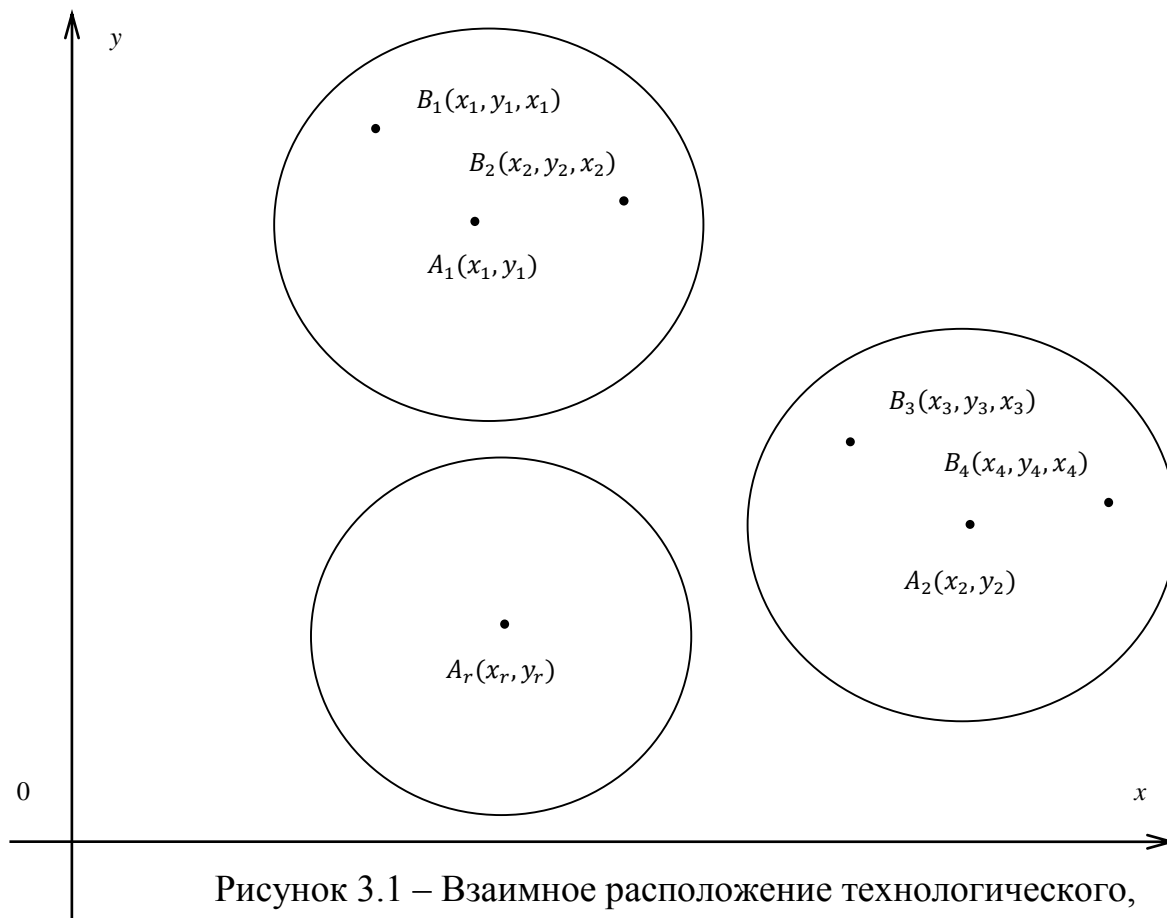


Рисунок 3.1 – Взаимное расположение технологического, вспомогательного оборудования и робота

Определение взаимного расположения ТВО и ПР представим в виде задачи оптимизации. Пусть будут заданы взаимные расположения ТВО, которое определяется требованиями технологии производства. Варьируемым параметром является точка установки ПР. С учетом условия размещения оборудования и робота в производственном помещении и их аппроксимации цилиндрами задача оптимизации решается на плоскости координат $OXYZ$.

Задачу минимизации производственной площади (3.10) занимаемой РТК, представим в виде задачи минимизации расстояния между ТВО и ПР:

$$\sum_1^m (x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2 \rightarrow 0, \quad (3.11)$$

при ограничениях

$$\forall i = \overline{1, m}: (x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2 - R_i - R_r \geq 0, \quad (3.12)$$

$$\forall j = \overline{1, s}: L(D_k(x_j, y_j, z_j) \geq 0) = 1. \quad (3.13)$$

Ограничение (3.12) является условием взаимного не пересечения цилиндров аппроксимирующих ПР и оборудование. Ограничение (3.13) является условием охвата РП всех требуемых точек позиционирования рабочего органа ПР.

Минимум целевой функции известен и он равняется величине $\sum_1^r R_i +$

R_r . Поэтому значение целевой функции стремится не к нулю, а к величине минимума $\sum_1^r R_i + R_r$.

Для решения данной задачи необходимо определить направление и величину шага поиска оптимума целевой функции (3.11), при выполнении ограничений (3.12), (3.13).

Направление поиска можно определить несколькими способами. По первому способу, первоначально перейдем от системы координат связанной с производственной площадью $OXYZ$, к системе координат связанных с промышленным роботом $O'X'Y'Z'$, тогда координаты центров цилиндров аппроксимирующих ТВО будут равны

$$\forall i = \overline{1, m}: x'_i = x_i - x_r, y'_i = y_i - y_r, \quad (3.14)$$

а координаты требуемых точек позиционирования рабочего органа ПР, в новой системе координат будут равны

$$\forall j = \overline{1, s}: x'_j = x_j - x_r, y'_j = y_j - y_r, z'_j = z_j. \quad (3.15)$$

Далее соединяем новое начало координат с точками, задающими центры цилиндров (3.14), аппроксимирующих ТВО.

Следующим шагом вычисляем углы наклона прямых соединяющих начало координат с центрами цилиндров:

$$\varphi_i = \arctg \frac{y'_i}{x'_i}. \quad (3.16)$$

Определим направление поиска оптимума задачи (3.11), при ограничениях (3.12), (3.13), как среднее арифметическое всех углов φ_i (3.16):

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^m \varphi_i}{m}. \quad (3.17)$$

Величина шага поиска экстремума Δ не должен превышать длины радиуса цилиндров $R_i, i = \overline{1, m}$.

С учетом вышеизложенного алгоритм решения задачи (3.11), при ограничениях (3.12), (3.13) примет следующий вид.

НАЧАЛО.

Шаг 0. Ввод исходных значений:

$A_r(x_r, y_r)$, R_r – координаты центра и радиус цилиндра аппроксимирующего ПР, $A_i(x_i, y_i)$, $R_i, i = \overline{1, m}$ – координаты центров и величины радиусов цилиндров аппроксимирующих ТВО, $B_j(x_j, y_j, z_j), j = \overline{1, s}$, – требуемые точки позиционирования схвата или рабочего органа ПР, $(R_1(x, y, z) \geq 0)L^R(R_2(x, y, z) \geq 0)L^R \dots L^R(R_n(x, y, z) \geq 0) = 1$, – логическое выражение описывающее РП ПР, Δ – шаг поиска решения задачи, $F = \infty$ – начальное значение критерия оптимизации.

Шаг 1. $i=1$.

Шаг 2. $\varphi_i = \arctg \frac{y'_i}{x'_i}$.

Шаг 3. $i=i+1$.

Шаг 4. Если $i \leq m$, то перейти к шагу 2, в противном случае перейти к шагу 5.

Шаг 5. $\varphi = \frac{\sum_{i=1}^m \varphi_i}{m}$.

Шаг 6. $x_r = x_r + \Delta \cos \varphi, y_r = y_r + \Delta \sin \varphi$

Шаг 7. $i=1$.

Шаг 8. $x_i = x_i - x_r, y_i = y_i - y_r$

Шаг 9. $i=i+1$.

Шаг 10. Если $i \leq m$, то перейти к шагу 8, в противном случае перейти к шагу 11.

Шаг 11. $j=1$.

Шаг 12. $x_j = x_j - x_r, y_j = y_j - y_r, z_j = z_j$.

Шаг 13. $j=j+1$.

Шаг 14. Если $j \leq s$, то перейти к шагу 12, в противном случае перейти к шагу 15.

Шаг 15. $i=1$.

Шаг 16. Если $x_i^2 + y_i^2 - R_i - R_r \geq 0$, то $L_i = 1$, в противном случае $L_i = 0$.

Шаг 17. $i=i+1$.

Шаг 18. Если $i \leq m$, то перейти к шагу 16, в противном случае перейти к шагу 19.

Шаг 19. Если $L_1 \cap L_2 \cap \dots \cap L_m = 1$, то перейти к шагу 20, в противном случае перейти к шагу 27.

Шаг 20. $j=1$.

Шаг 21. Если $L(D_k(x_j, y_j, z_j) \geq 0) = 1$, то $L_j = 1$, в противном случае $L_j = 0$.

Шаг 22. $j=j+1$.

Шаг 23. Если $j \leq s$, то перейти к шагу 21, в противном случае перейти к шагу 24.

Шаг 24. Если $L_1 \cap L_2 \cap \dots \cap L_s = 1$, то перейти к шагу 25, в противном случае перейти к шагу 1.

Шаг 25. $F_1 = \sum_1^m (x_i'^2 + y_i'^2)$.

Шаг 26. Если $F_1 < F$, то $F=F_1$ и перейти к шагу 1, в противном случае перейти к шагу 27.

Шаг 27. Вывод значений $F, A_i(x_i, y_i), B_j(x_j, y_j, z_j)$.

КОНЕЦ.

На шаге 0, вводятся исходные данные, робот должен быть расположен в точке, при котором исключено взаимное столкновение с ТВО. От первого до шестого шага вычисляется направление поиска экстремума по формуле (3.16), (3.17) и определяются новые координаты центра робота. На 7 шаге по 14 шаг производится перерасчет координат центров окружностей аппроксимирующих ТВО, а также требуемых точек позиционирования схвата или рабочего органа на основе выражений (3.14), (3.15). Начиная с шага 15 по шаг 19, производится проверка условия, взаимного не пересечения промышленного робота, технологического и вспомогательного оборудования, согласно, логического выражения (3.12). В случае выполнения этого условия задача решается далее, в противном случае решение задачи

заканчивается. На 20 шаге по 24 шаг определяется условие охвата рабочим пространством робота всех требуемых точек позиционирования схвата или рабочего органа, согласно, логического выражения (3.13). В случае выполнения этого условия, определяется значение функционала (3.11), которое сравнивается с предыдущим значением. Если значение функционала уменьшается, то задача решается далее, в противном случае выводится решение задачи.

Недостатком разработанного алгоритма является отсутствие алгоритма обхода препятствий, не полный учет всех возможных взаимных расположений РП робота, относительно требуемых точек позиционирования схвата или рабочего органа. Однако, его результаты применимы на предварительных стадиях разработки КС. На основании результатов работы алгоритма можно оценить возможность применения рассматриваемой модели ПР для роботизации заданного ТП.

3.3 Разработка алгоритма построения компоновочной схемы роботизированного технологического комплекса при аппроксимации её прямоугольными цилиндрами

Задача построения КС РТК решается при заданном взаимном расположении окружностей аппроксимирующих ТВО. Необходимо определить такое расположения окружности аппроксимирующей ПР, при котором минимизируется расстояние между центрами окружностей аппроксимирующих ПР и ТВО, а также выполняется условие охвата РП ПР всех требуемых точек позиционирования.

Первоначальное взаимное расположение окружностей аппроксимирующих ПР и ТВО должно соответствовать рисунку 3.1, то есть все точки соответствующие центрам окружностей $A_r(x_r, y_r)$ и $A_i(x_i, y_i)$ $i = \overline{1, m}$ и сами окружности радиусов R_r и R_i , $i = \overline{1, m}$ должны располагаться в первом квадранте выбранной системы координат OXY .

Для упрощения решения задачи необходимо перейти от выбранной системы координат $OXYZ$ к системе координат связанной с центром окружности аппроксимирующей ПР O', X', Y', Z' , то есть координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i(x_i, y_i)$, $i = \overline{1, m}$ будут определены выражением (3.14) Тогда координаты центра окружности аппроксимирующего ПР совпадут с началом координат системы O', X', Y' . В этой же системе координат O', X', Y', Z' зададим координаты требуемых точек позиционирования выражением (3.15).

Для реализации выражения (3.14) разработана процедура СКЦПР, блок схема которой приведена на рисунке 3.2. Эта процедура СКЦПР подобна процедуре СКПР блок – схема которой приведена на рисунке 2.22.

Отличие данных процедур заключается в использовании вместо точки установки ПР $P_y(x_y, y_y, z_y)$, центра окружности аппроксимирующей ПР $A_r(x_r, y_r)$ и вместо требуемых точек позиционирования $A_j(x_j, y_j, z_j)$, $(j =$

$1, 2, \dots, m$), точек центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i(x_i, y_i)$, $i = \overline{1, m}$.

Входными данными процедуры СКЦПР будут координаты центра окружности аппроксимирующей ПР $A_r(x_r, y_r)$ и координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i(x_i, y_i)$, $i = \overline{1, m}$. Далее в цикле по формуле (3.14) определяются новые координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A'_i(x'_i, y'_i)$, $i = \overline{1, m}$, которые и являются выходными данными данной процедуры.

Для реализации выражения (3.15) разработана процедура СКТПР, которая производит переход в новую систему координат требуемых точек позиционирования схвата ПР $B_j(x_j, y_j, z_j)$, $j = \overline{1, s}$.

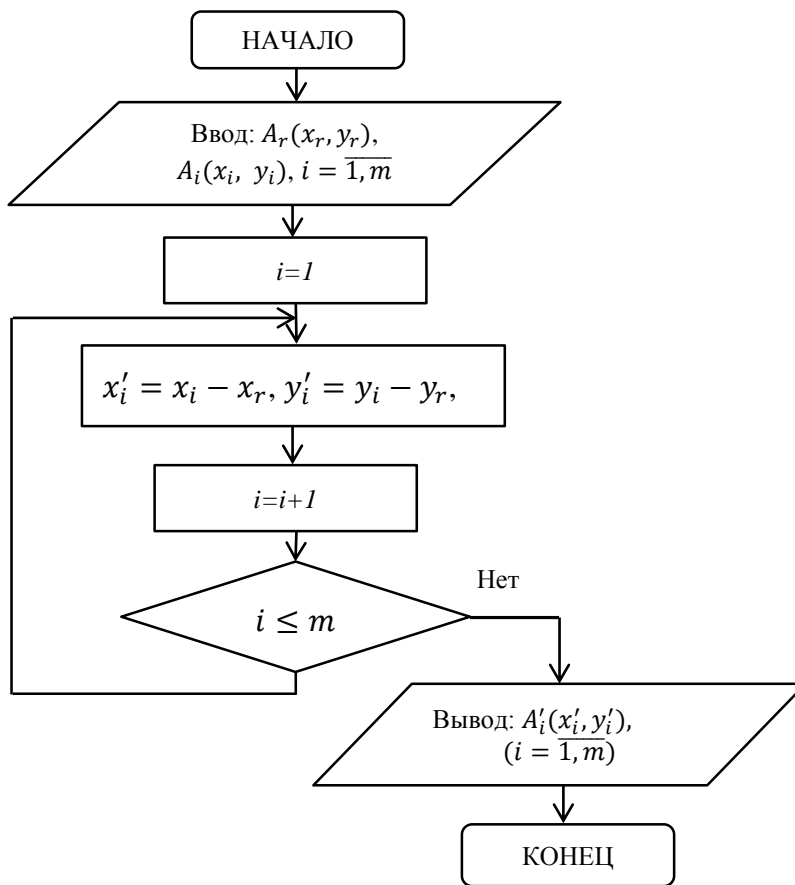


Рисунок 3.2 – Блок-схема процедуры СКЦПР

Блок – схема процедуры СКТПР представлена на рисунке 3.3. Входными данными процедуры СКТПР будут координаты центра окружности аппроксимирующей ПР $A_r(x_r, y_r)$ и координаты требуемых точек позиционирования $B_j(x_j, y_j, z_j)$, $j = \overline{1, s}$. Далее в цикле по формуле (3.15) определяются новые координаты требуемых точек позиционирования $B'_j(x'_j, y'_j, z'_j)$, $j = \overline{1, s}$, которые и являются выходными данными данной процедуры.

В результате реализации данных процедур СКЦПР и СКТПР постановка

задачи поиска оптимума целевой функции (3.11), при выполнении ограничений (3.12) и (3.13) изменится и примет следующий вид:

$$\sum_1^m (x_i'^2 + y_i'^2) \rightarrow 0, \quad (3.18)$$

при ограничениях

$$\forall i = \overline{1, m}: x_i'^2 + y_i'^2 - R_i - R_r \geq 0, \quad (3.19)$$

$$\forall j = \overline{1, s}: L(D_k(x_j', y_j', z_j') \geq 0) = 1. \quad (3.20)$$

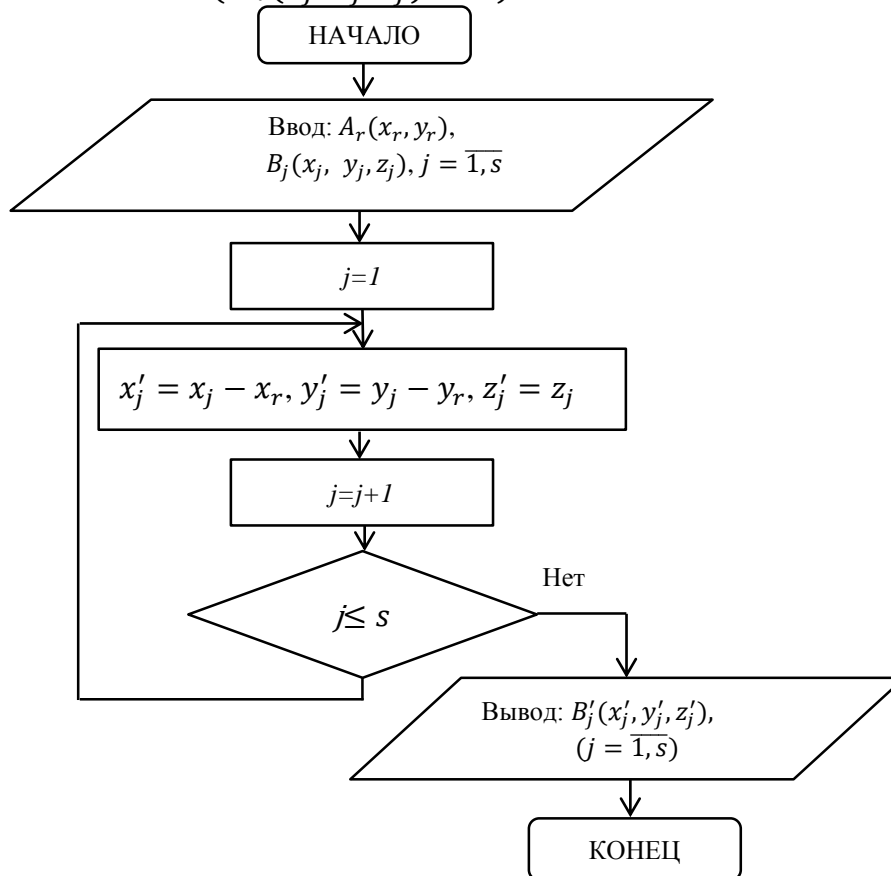


Рисунок 3.3 – Блок-схема процедуры СКТПР

Для решения данной задачи необходимо определить направление и величину шага поиска оптимума целевой функции (3.18), при выполнении ограничений (3.19) и (3.20).

Для определения направления поиска решения задачи, первоначально определим углы наклона φ_i прямой соединяющей центр окружности аппроксимирующего ПР и центр окружности аппроксимирующего i – тое ТВО. Для определения этого угла необходимо проанализировать возможные взаимные расположения окружностей аппроксимирующих ПР и ТВО (рисунок 3.4).

Как видно из рисунка 3.4 углы наклона φ_i зависят от соотношений координат средних точек $A_r(x_r, y_r)$ и $A_i(x_i, y_i)$. Координаты точки $A_r(x_r, y_r)$ совпадут с началом координат и следовательно $x_r = 0, y_r = 0$. Как видно из рисунка 3.4 возможны 8 различных взаимных расположений центров аппроксимирующего ПР и центров окружностей аппроксимирующих ТВО.

Если значения координаты $x_3 = 0$, при этом значение координаты $y_3 > 0$, в этом случае расположение центра окружности соответствует точке $A_3(x_3, y_3)$. (рисунок 3.4), в этом случае величина угла равна

$$\varphi_3 = 90^\circ. \quad (3.21)$$

В случае значения координаты $x_7 = 0$, и значении координаты $y_7 > 0$, то расположение центра окружности соответствует точке $A_7(x_7, y_7)$ (рисунок 3.4), тогда значение угла равно

$$\varphi_7 = 270^\circ. \quad (3.22)$$

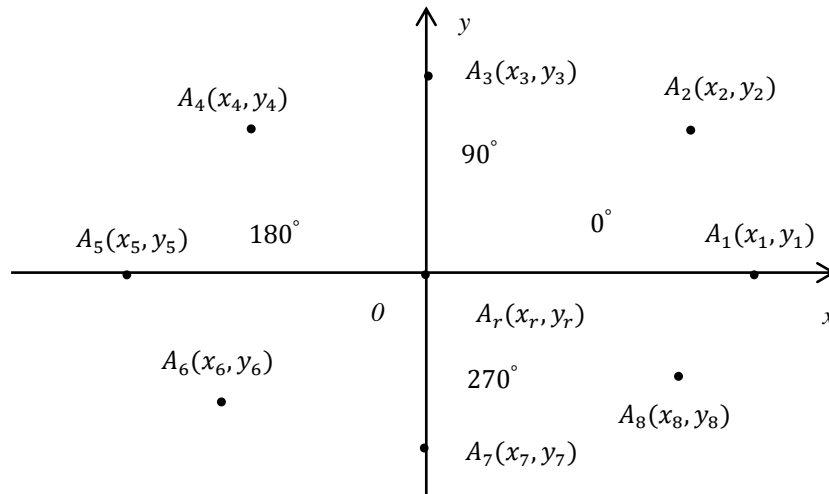


Рисунок 3.4 – Возможные взаимные расположения центров окружностей аппроксимирующих ПР и ТВО

Если же значение координаты $y_1 = 0$, при значении координаты $x_1 > 0$, то расположение центра окружности соответствует точке $A_1(x_1, y_1)$ (рисунок 3.4), тогда значение угла будет равно

$$\varphi_1 = 0^\circ. \quad (3.23)$$

В случае значения координаты $y_r = y_5$ при условии, что значение координаты $x_5 < 0$, расположение данной центра окружности соответствует точке $A_5(x_5, y_5)$ (рисунок 3.4), тогда значение угла равно

$$\varphi_5 = 180^\circ. \quad (3.24)$$

Если значения координаты $x_2 > 0$, при этом значение координаты $y_2 > 0$, тогда расположение центра окружности соответствует точке $A_2(x_2, y_2)$ (рисунок 3.4), в этом случае значение угла вычисляется по следующей формуле

$$\varphi_2 = \arctg \frac{y_2}{x_2}. \quad (3.25)$$

Если значения координаты $x_8 > 0$, а значение координаты $y_8 < 0$, тогда расположение центра окружности соответствует точке $A_8(x_8, y_8)$ (рисунок 3.4), тогда значение угла можно вычислить следующим образом

$$\varphi_8 = 360^\circ - \arctg \frac{y_8}{x_8}. \quad (3.26)$$

Если же значения координаты $x_4 < 0$, при значении координаты $y_4 > 0$,

тогда расположение центра окружности соответствует точке $A_4(x_4, y_4)$ (рисунок 3.4), в этом случае значение угла вычисляется следующим образом

$$\varphi_4 = 180^\circ - \operatorname{arctg} \frac{y_4}{x_4}. \quad (3.27)$$

Если значения координаты $x_6 < 0$, при этом значение координаты $y_6 < 0$, тогда расположение центра окружности соответствует точке $A_6(x_6, y_6)$ (рисунок 3.4), тогда значение угла вычисляется на основе следующего выражения

$$\varphi_6 = 180^\circ + \operatorname{arctg} \frac{y_6}{x_6}. \quad (3.28)$$

Блок-схема процедуры ОЦО определения угла наклона φ_i прямой соединяющей центр окружности аппроксимирующего ПР и центр окружности аппроксимирующего i – тое ТВО приведена на рисунке 3.5. Учитывая, что центр окружности аппроксимирующей ПР совпадает с началом координат, вводятся $A_i(x_i, y_i)$, $i = \overline{1, m}$ центры окружностей аппроксимирующих ТВО.

Далее определяются при помощи выражений (3.21) – (3.28) величины углов наклона прямых соединяющих начало координат и центры окружностей аппроксимирующих каждое i – тое ТВО φ_i . Величина угла φ_i наклона прямой соединяющей начало координат и центр окружности аппроксимирующего i – тое ТВО является выходным параметром данной процедуры ОЦО.

Тогда направление поиска решения задачи, как среднее арифметическое всех углов φ_i , $i = \overline{1, m}$, тогда:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^m \varphi_i}{m}. \quad (3.29)$$

Для определения угла направления поиска решения, разработана процедура ОНПР, блок-схема которой показана на рисунке 3.6.

Входными параметрами процедуры ОНПР являются $A_i(x_i, y_i)$, $i = \overline{1, m}$ координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО. Используя процедуру ОЦО, на каждом шаге вычисляются значения φ_i , $i = \overline{1, m}$. Далее по вычисленным значениям φ_i по формуле (3.29) определяется φ , угол задающий направление поиска решения данной задачи. Значение угла φ является параметром вывода процедуры ОНПР.

Шаг Δ , поиска решения задачи построения КС РТК выберем меньше величины наименьшего радиуса окружности аппроксимирующего ТВО:

$$R_{min} = \min(R_i), (i = \overline{1, m}). \quad (3.30)$$

Выбор величины шага Δ , поиска решения задачи построения КС РТК выберем из условия (3.30), с учетом заданной точности решения, который зададим множителем $0 < \delta < 1$, тогда

$$\Delta = \delta \times R_{min}, (0 < \delta < 1). \quad (3.31)$$

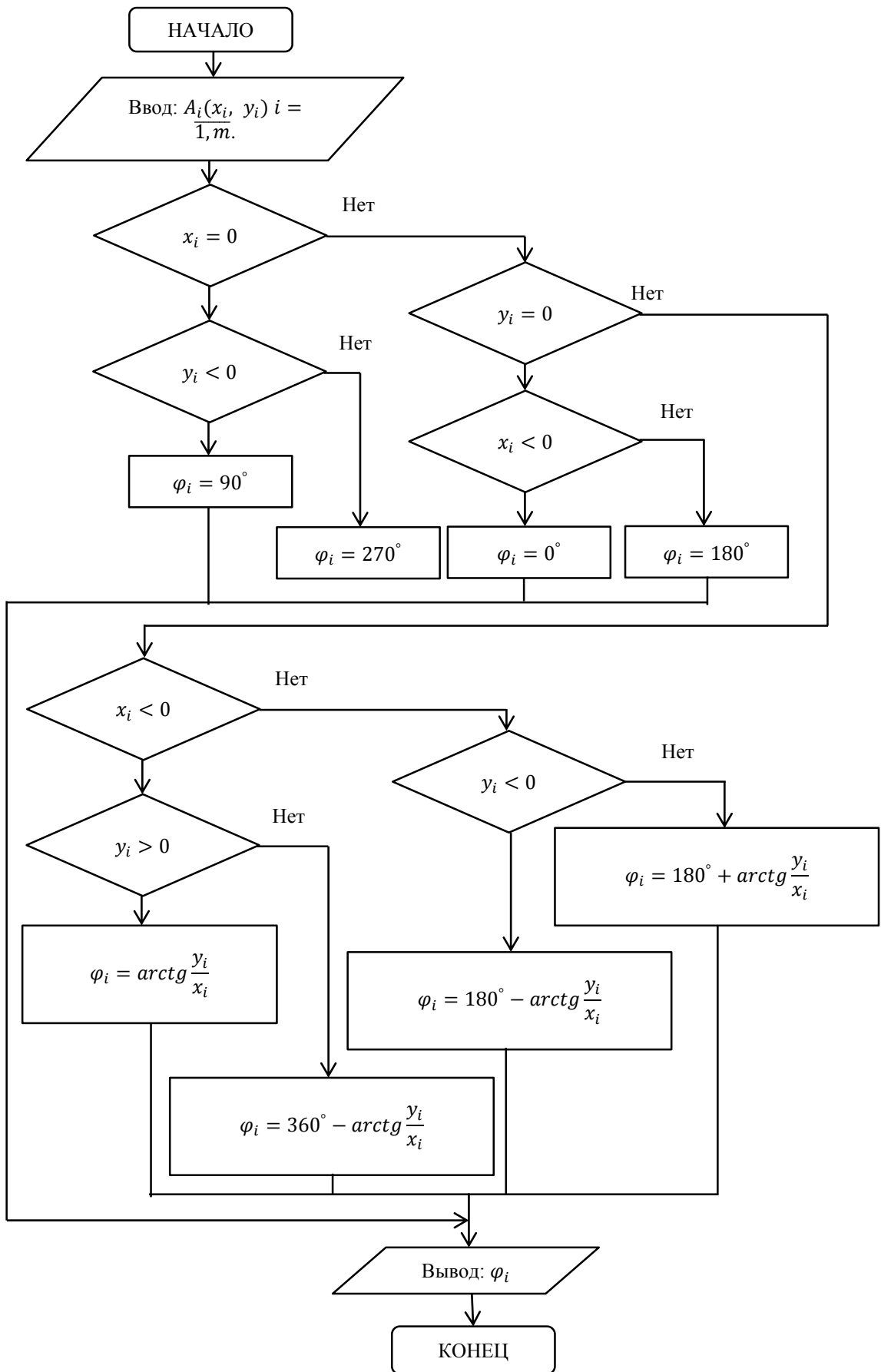


Рисунок 3.5 – Блок-схема процедуры ОЦО

После того как выбрано направление поиска решения задачи угол φ необходимо осуществить перемещение центра окружности соответствующей началу координат с заданным шагом Δ , тогда (рисунок 3.7):

$$\Delta_x = \Delta \cos \varphi, \Delta_y = \Delta \sin \varphi. \quad (3.32)$$

После определения направления и величины шага поиска решения задачи построения КС, необходимо определить новое положение ПР относительно ТВО.

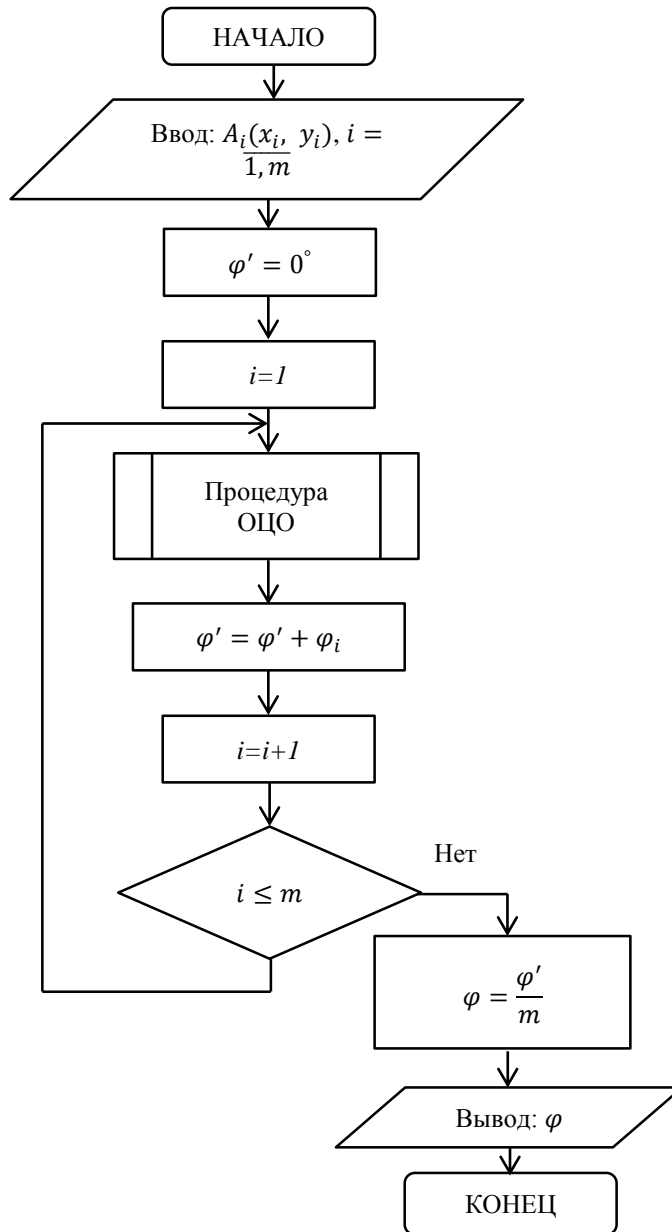


Рисунок 3.6 – Блок-схема процедуры ОНПР

Новое положение ПР соответствует точке конца вектора $\vec{\Delta}$. При этом изменятся значения координат центров окружностей аппроксимирующих ТВО, координаты которых будут равны:

$$\forall i = \overline{1, m}: x'_i = x_i - \Delta_x, y'_i = y_i - \Delta_y, \quad (3.33)$$

где Δ_x – проекция вектора $\vec{\Delta}$ на ось OX (рисунок 3.7),

Δ_y – проекция вектора $\vec{\Delta}$ на ось OY (рисунок 3.7).

В этом случае производится параллельный перенос начала координат по величине и направлению вектора $\vec{\Delta}$.

Для реализации (3.30) – (3.32) разработана процедура ОПШП, блок-схема которой приведена на рисунке 3.8. Исходными данными являются R_i , $i = \overline{1, m}$ радиусы окружностей аппроксимирующих ТВО, δ – множитель, задающий требуемую точность (3.27), φ – угол задающий направление поиска решения данной задачи. С применением выражения (3.30), определяется минимальный радиус окружности аппроксимирующей ТВО R_{min} . По формуле (3.31) определяем величину шага Δ , поиска решения данной задачи. В результате выполнения процедуры выводим значения проекций, шага поиска решения задачи Δ_x , Δ_y .

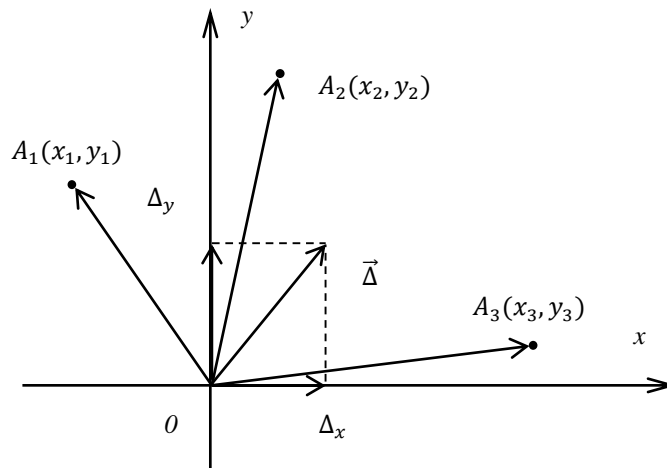


Рисунок 3.7 – Новое положение ПР относительно ТВО

Зная величины шага поиска решения задачи построения КС РТК при аппроксимации её элементов окружностями, необходимо осуществить переход к новой системе координат, связанной с точкой конца вектора $\vec{\Delta}$, значения которой равны (Δ_x, Δ_y) . Тогда координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО будет равно:

$$\forall i = \overline{1, m}: x_i'' = x_i' + \Delta_x, y_i'' = y_i' + \Delta_y, \quad (3.34)$$

а координаты требуемых точек позиционирования рабочего органа ПР, в новой системе координат будут равны

$$\forall j = \overline{1, s}: x_j'' = x_j' + \Delta_x, y_j'' = y_j' + \Delta_y, z_j'' = z_j'. \quad (3.35)$$

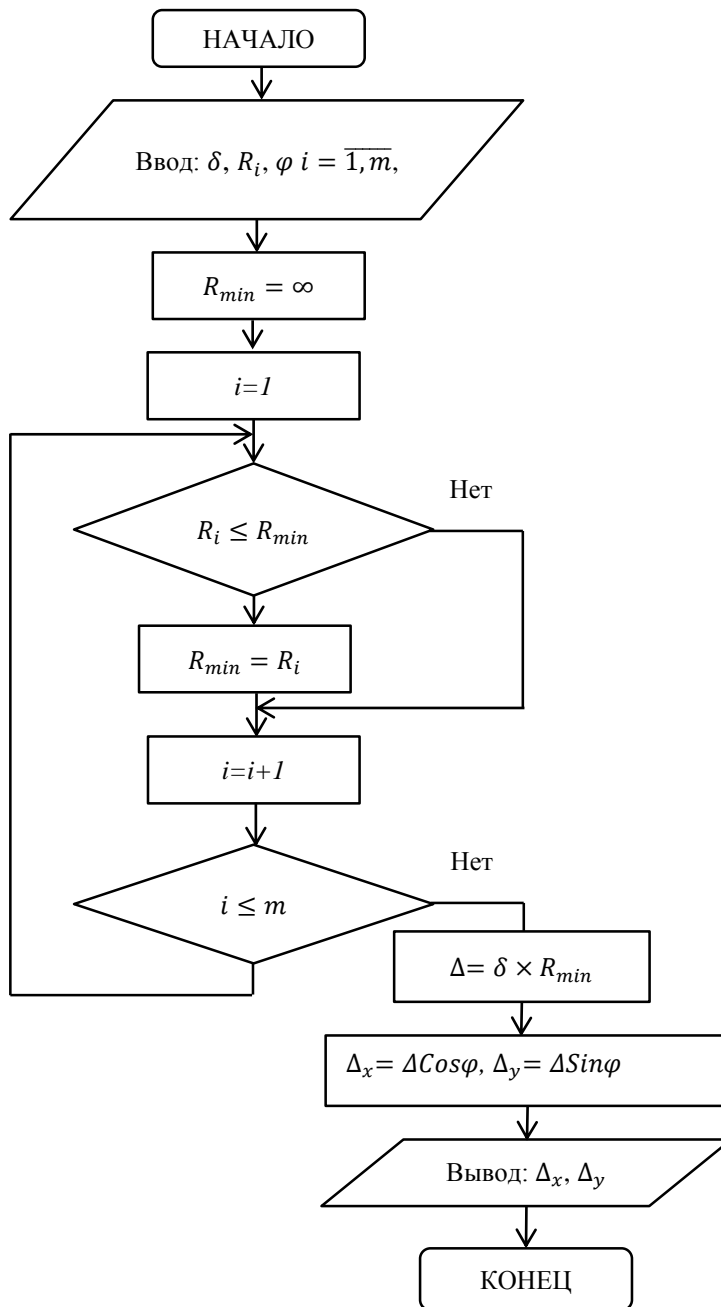


Рисунок 3.8 – Блок-схема процедуры ОПШП

Для реализации выражения (3.34) разработана процедура СКНЦО, блок – схема которой приведена на рисунке 3.9. Входными данными процедуры СКНЦО будут значения проекций вектора $\vec{\Delta}$, Δ_x, Δ_y и координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A'_i(x'_i, y'_i)$, $i = \overline{1, m}$. Далее в цикле по формуле (3.34) определяются новые координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A''_i(x''_i, y''_i)$, $i = \overline{1, m}$, которые и являются выходными данными данной процедуры.

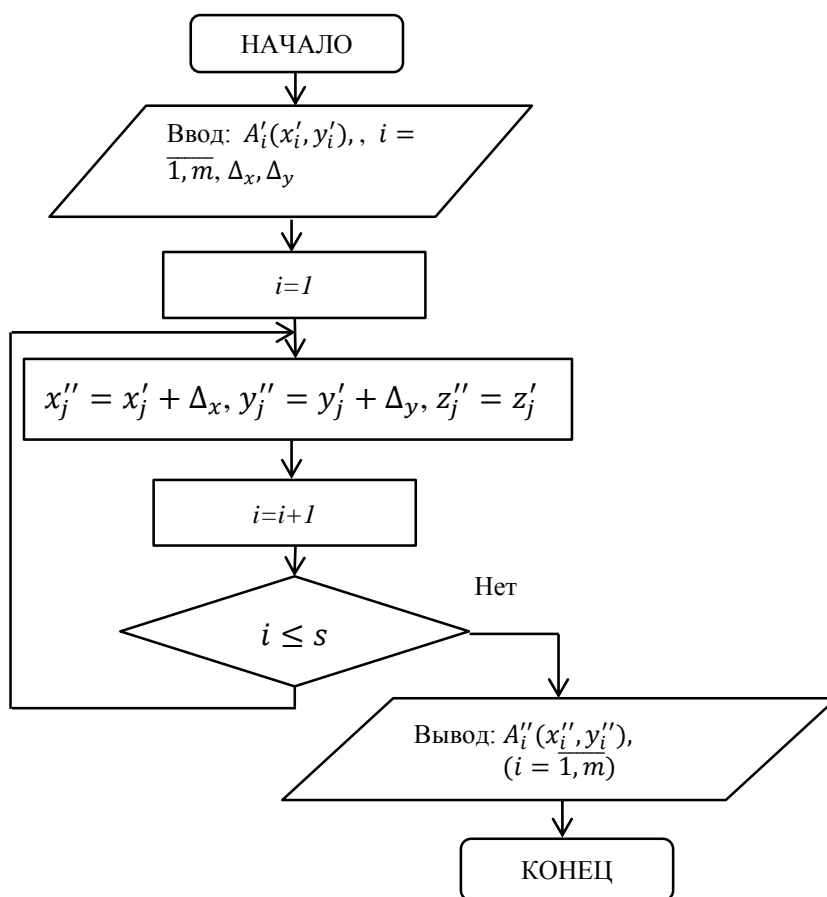


Рисунок 3.9 – Блок-схема процедуры СКНЦО

Для реализации выражения (3.35) разработана процедура СКНТП, которая производит переход в новую систему координат требуемых точек позиционирования схвата ПР $B_j'(x_j', y_j', z_j')$, $j = \overline{1, s}$. Блок – схема процедуры СКНТП представлена на рисунке 3.10.

Входными данными процедуры СКНТП будут значения проекций вектора $\vec{\Delta}$, Δ_x, Δ_y и координаты требуемых точек позиционирования $B_j'(x_j', y_j', z_j')$, $j = \overline{1, s}$. Далее в цикле по формуле (3.35) определяются новые координаты требуемых точек позиционирования $B_j''(x_j'', y_j'', z_j'')$, $j = \overline{1, s}$, которые и являются выходными данными данной процедуры.

Для анализа условия взаимного не пересечения окружностей аппроксимирующих ПР и ТВО, с применением условия (3.19) разработана процедура ОПО, блок – схема которой представлена на рисунке 3.11.

Входными параметрами процедуры ОПО будут координаты центров и радиусы окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i''(x_i'', y_i'')$, R_i , $i = \overline{1, m}$, радиус окружности аппроксимирующей ПР R_r . В цикле проверяется условие взаимного не пересечения окружностей аппроксимирующих ПР и каждое i – тое ТВО (3.19). Если условие (3.19) не выполнено то делается вывод о взаимном пересечении окружностей аппроксимирующих ПР и ТВО и логической величине $D=0$. Если все окружности аппроксимирующие ТВО и окружность аппроксимирующая ПР не пересекаются, то логическому

параметру $D=1$. Данный логический параметр является выходной величиной процедуры ОПО.

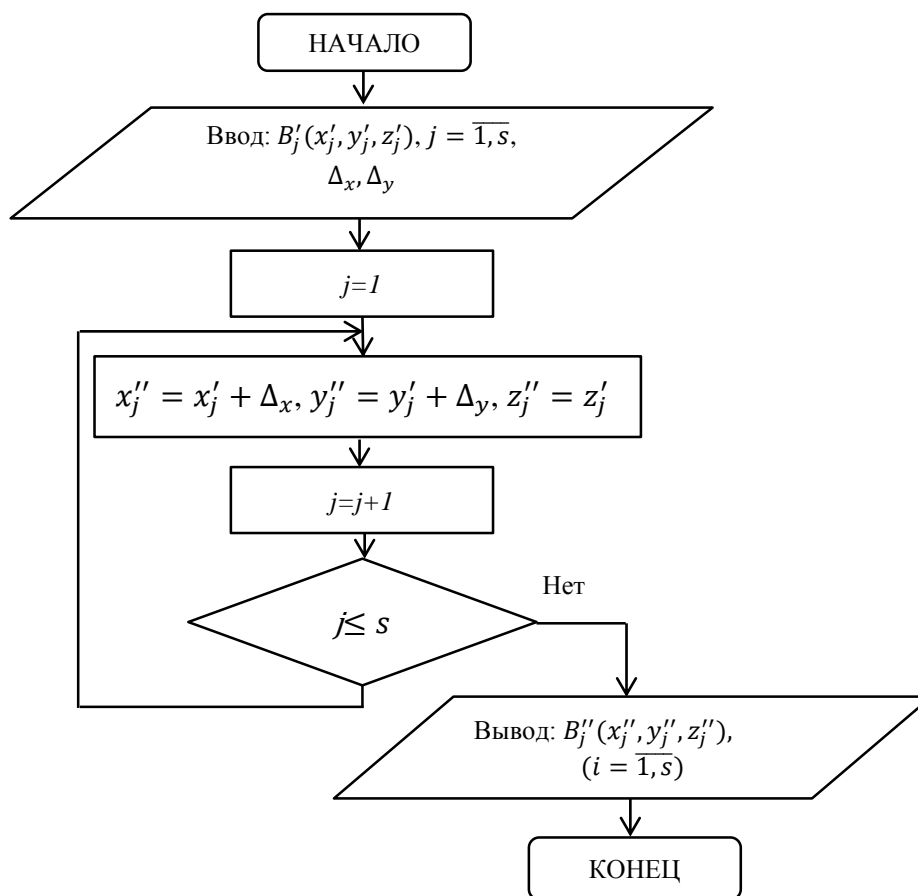


Рисунок 3.10 – Блок-схема процедуры СКНТП

Для определения охвата РП ПР всех требуемых точек позиционирования схвата ПР необходимо определить наиболее удаленную точку $A_d(x_d, y_d, z_d)$ (2.138). Подобная процедура имела место и при выборе ПР по РП, процедура ВМТП.

Используя процедуру ВМТП (рисунок 2.26) определим точку $A_d(x_d, y_d, z_d)$. Далее используя процедуры описания РП ПР необходимо обеспечить охват самой удаленной точки $A_d(x_d, y_d, z_d)$. Если самая удаленная точка принадлежит РП ПР, то проверяется условие охвата всех требуемых точек позиционирования $B_j''(x_j'', y_j'', z_j'')$, $j = \overline{1, s}$. Далее проверяется условие взаимного не пересечения окружностей аппроксимирующих ТВО и ПР.

Для реализации алгоритма построения компоновочной схемы при аппроксимации элементов РТК прямоугольными цилиндрами разработан алгоритм, блок – схема которого представлена на рисунке 3.12.

Входными данными алгоритма будут координаты центра и радиус окружности аппроксимирующей ПР $A_r(x_r, y_r)$, R_r , координаты центров окружностей и радиусов аппроксимирующих ТВО $A_i(x_i, y_i)$, R_i , $i = \overline{1, m}$, координаты требуемых точек позиционирования схвата ПР $B_j(x_j, y_j, z_j)$, $j =$

$\overline{1, s}$, множитель, задающий требуемую точность решения задачи δ .

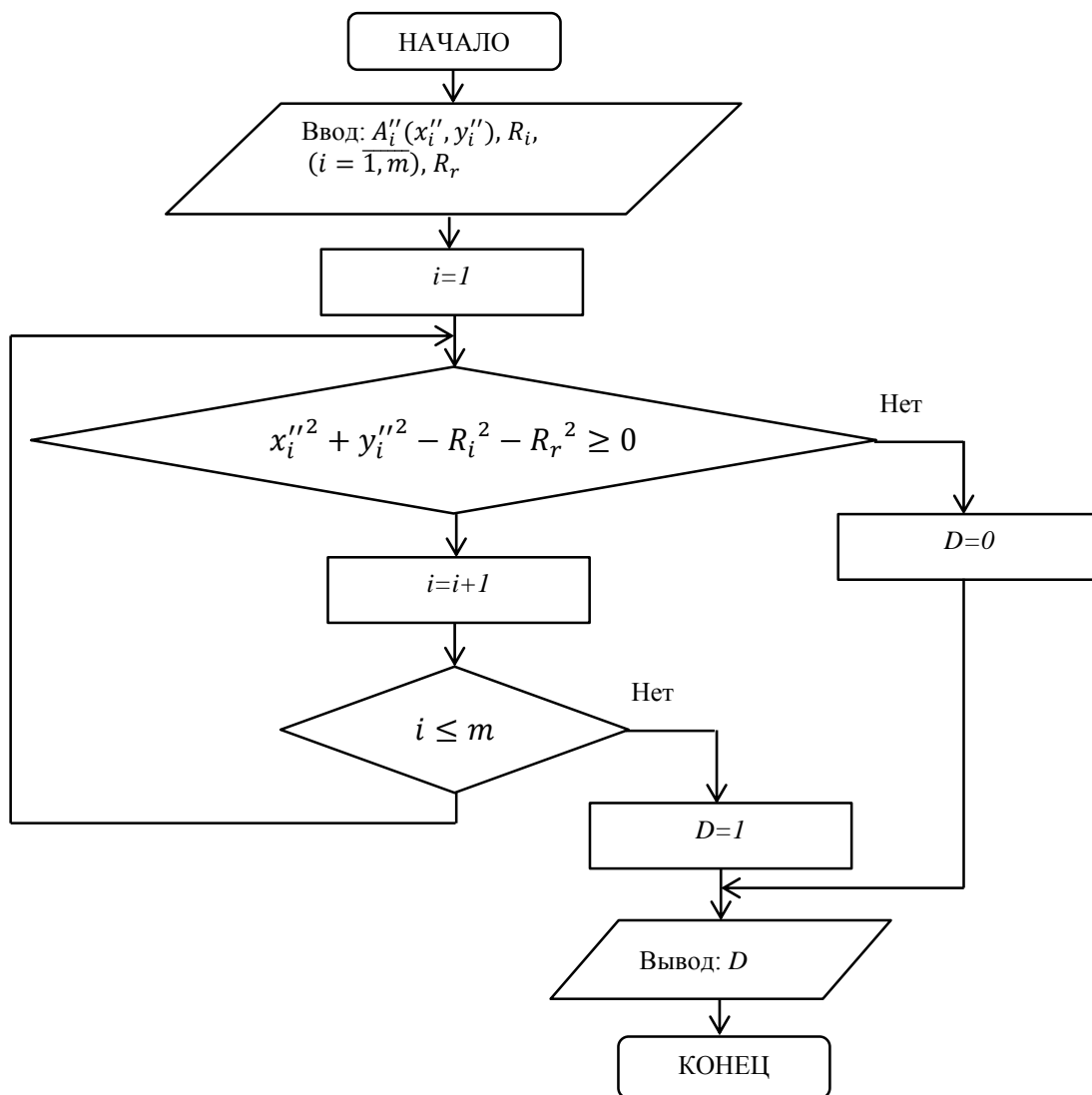
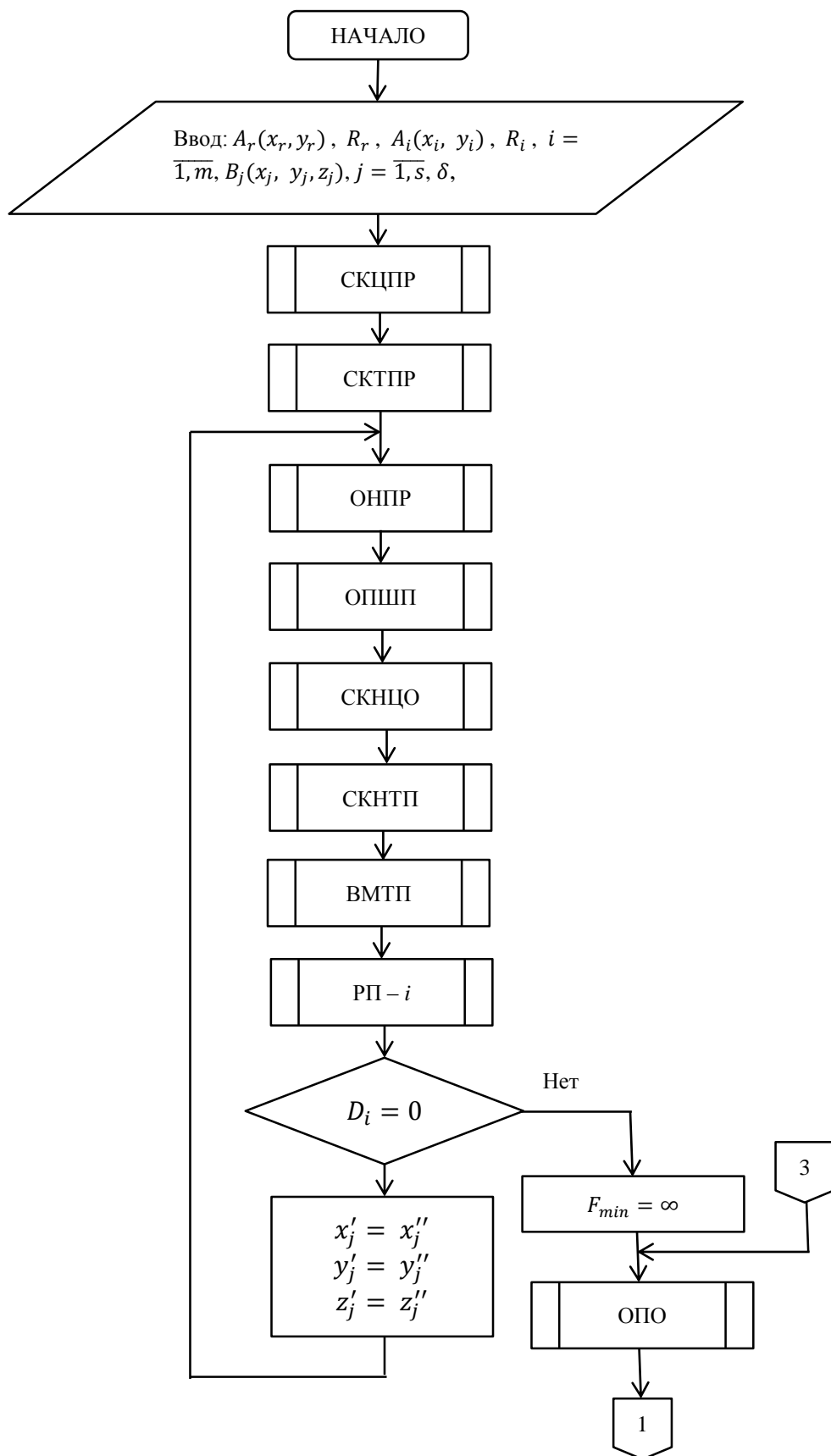
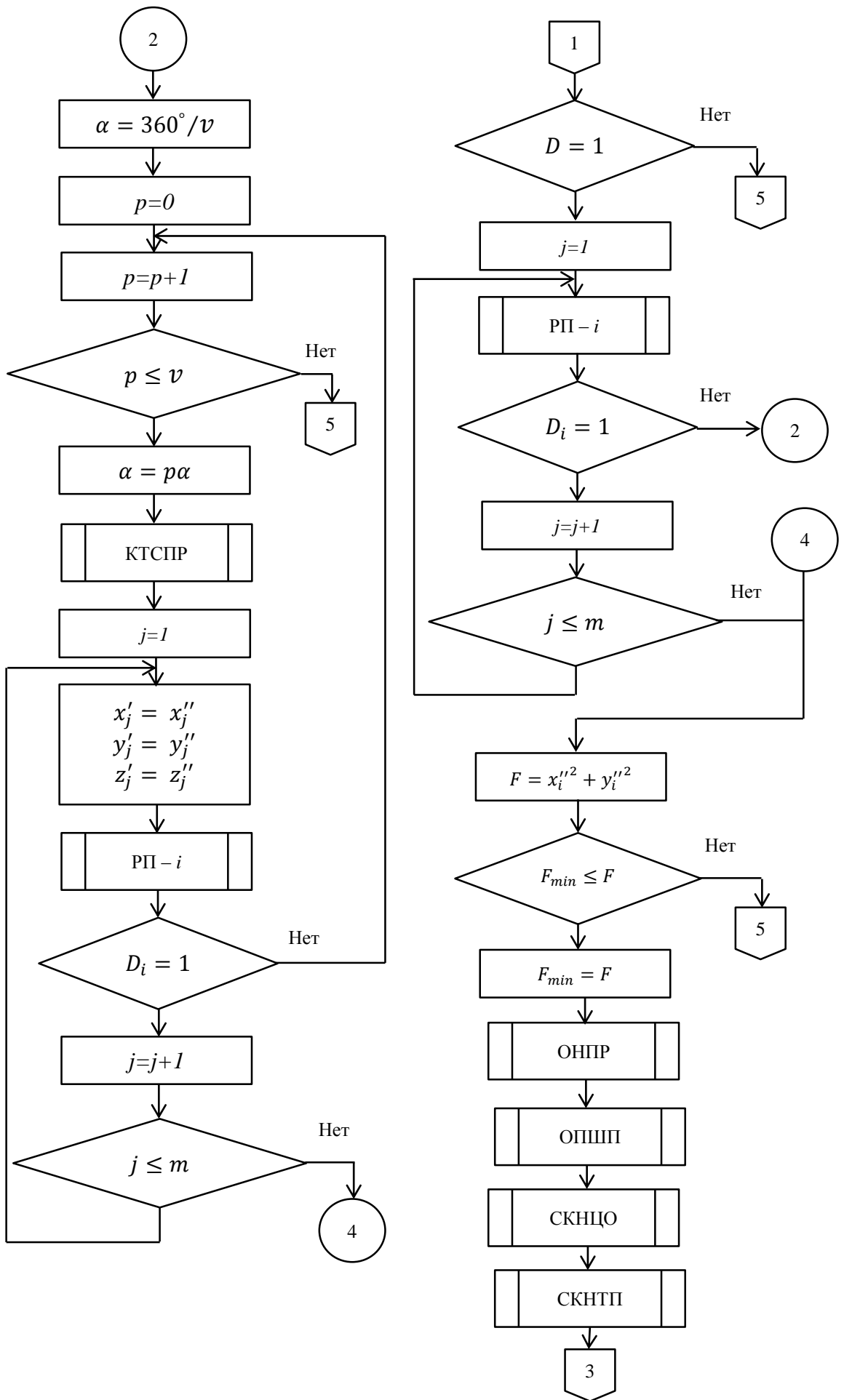


Рисунок 3.11 – Блок-схема процедуры ОПО

Далее при помощи процедуры СКЦПР на основе координат центра окружности аппроксимирующей ПР $A_r(x_r, y_r)$ и координат центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i(x_i, y_i)$, $i = \overline{1, m}$, определяются новые координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i'(x_i', y_i')$, $i = \overline{1, m}$. Следующая процедура СКТПР, производит переход в новую систему координат требуемых точек позиционирования схвата ПР $B_j(x_j, y_j, z_j)$, $j = \overline{1, s}$. Процедура ОНПР на основе координат центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i(x_i, y_i)$, $i = \overline{1, m}$, с использованием процедуры ОЦО, вычисляются значения φ_i , $i = \overline{1, m}$. Далее по вычисленным значениям φ_i определяется φ , угол задающий направление поиска решения данной задачи.





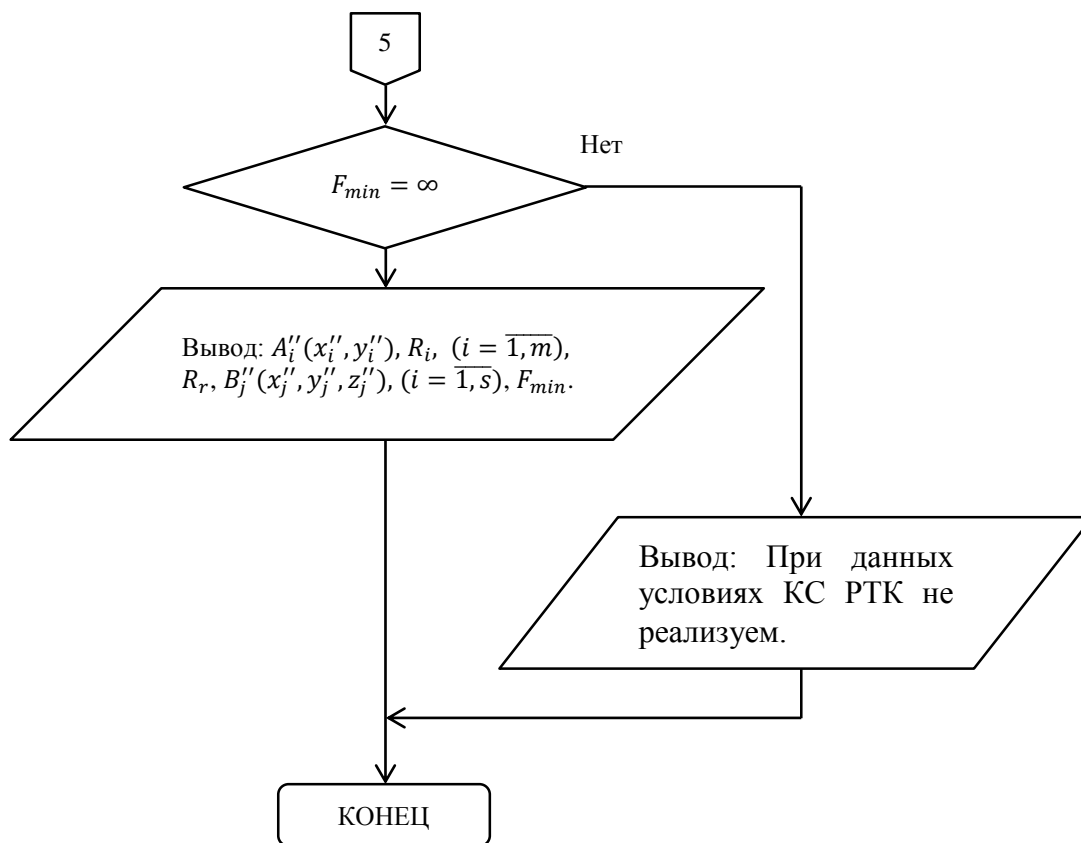


Рисунок 3.12 – Блок-схема алгоритма построения компоновочной схемы при аппроксимации элементов РТК прямоугольными цилиндрами

С применением процедуры ОПШП, определяются новые координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i''(x_i'', y_i'')$, $i = \overline{1, m}$. Значения проекций вектора $\vec{\Delta}$, Δ_x, Δ_y , определяются на основе значений R_i , $i = \overline{1, m}$ радиусов окружностей аппроксимирующих ТВО, δ – множителя, задающего требуемую точность и φ – угла задающего направление поиска решения данной задачи. В начале, определяется минимальный радиус окружности аппроксимирующей ТВО. Далее определяем величину шага Δ , поиска решения данной задачи. На основе значений проекций вектора $\vec{\Delta}$, Δ_x, Δ_y и координат центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i'(x_i', y_i')$, $i = \overline{1, m}$ определяются новые координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i''(x_i'', y_i'')$, $i = \overline{1, m}$.

Далее выполняется процедура СКНЦО для перехода к новой системе координат, связанной с точкой конца вектора $\vec{\Delta}$. Входными данными будут значения координат центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i'(x_i', y_i')$, $i = \overline{1, m}$, а выходными новые координаты центров окружностей аппроксимирующих ТВО $A_i''(x_i'', y_i'')$, $i = \overline{1, m}$.

Следующей выполняется процедура СКНТП, которая производит переход в новую систему координат требуемых точек позиционирования

схвата РП $B_j'(x_j', y_j', z_j')$, $j = \overline{1, s}$. В данной процедуре определяются новые координаты требуемых точек позиционирования $B_j''(x_j'', y_j'', z_j'')$, $j = \overline{1, s}$.

Входными параметрами процедуры ВМТП (рисунок 2.26), являются координаты требуемых точек позиционирования $A_j'(x_j', y_j', z_j')$, ($j = 1, 2, \dots, m$). В цикле на каждом шаге вычисляются значения l_j , $j = \overline{1, m}$. Далее по вычисленным значениям l_j используя выражение (2.138) находим значение l_d и координаты наиболее удаленной точки $A_d(x_d, y_d, z_d)$. Эти значения являются параметрами вывода процедуры ВМТП.

Это выполняется для выполнения условия охвата РП РП самой удаленной точки позиционирования, при помощи процедуры РП – i . Если данная точка не принадлежит РП РП, то осуществляется перемещение РП в направлении среднего угла, связанного со всеми требуемыми точками позиционирования. При помощи процедуры ОНПР определяется средний угол, который берется в качестве направления решения задачи. Далее повторяется выполнение процедур ОПШП, СКНЦО, СКНТП, ВМТП. Этот цикл повторяется до выполнения условия принадлежности удаленной точки позиционирования РП рассматриваемого РП.

В случае охвата РП РП самой удаленной точки, значению функционала качества присваивается ∞ . Далее выполняется процедура ОПО, при помощи которой осуществляется проверка условия взаимного не пересечения окружностей аппроксимирующих РП и ТВО. Если выполнено это условие, то далее проверяется условие охвата РП РП всех требуемых точек позиционирования. В цикле проверяется условие принадлежности каждой j – той точки РП РП при помощи процедуры РП – i . В случае не охвата следующей точки позиционирования производится изменение взаимного расположения точек позиционирования и РП РП путем вращения РП вокруг своей оси. Для этого задается шаг дискретизации угла поворота. Далее с помощью процедуры КТСРП (рисунок 2.23) определяются координаты точек позиционирования повернутых вокруг оси, связанной с точкой установки РП. В цикле осуществляется проверка принадлежности требуемых точек позиционирования РП РП.

Таким образом можно найти такое взаимное расположение РП РП, при котором будут охвачены все требуемые точки позиционирования. Для данного случая определяется новое значение функционала качества, которое сравнивается с текущим значением функционала. Если новое значение функционала меньше текущего, то значение функционала меняется и становится равным новому значению функционала. В обратном случае значение функционала не меняется.

Далее осуществляется переход на вывод значений взаимного расположения окружностей аппроксимирующих РП и ТВО, при котором РП РП охватывает все требуемые точки позиционирования. В случае если значение функционала не изменилось и не найдено такое взаимное расположение РП и ТВО, удовлетворяющее условиям взаимного не пересечения окружностей аппроксимирующих РП и ТВО и охвата РП РП

всех требуемых точек позиционирования.

3.4 Разработка компоновочных схем РТК производства товарного свинца, цинка и магния при аппроксимации её элементов прямоугольными цилиндрами

На основе разработанной блок-схемы алгоритма (рисунок 3.12) разработан пакет прикладных программ (ППП) построения КС РТК в программной среде Delphi 7 [128]. Листинг основного модуля программы приведен в приложении 3. Вследствие большого объема, не приведены файл проекта, модуль служебных утилит, модуль настроек.

Основное окно программы построения КС РТК показано на рисунке 3.13.

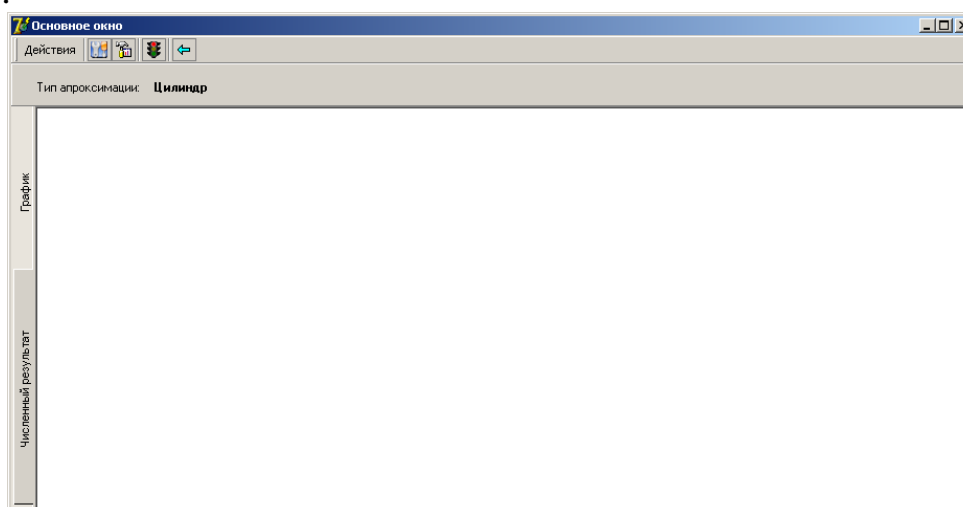


Рисунок 3.13 – Основное окно программы

Оно состоит из меню, в котором задаются параметры и основного фрейма, содержащего результаты расчетов в текстовом и графическом виде для двух типов аппроксимации: цилиндра и многоугольника (рисунок 3.14).

В меню доступны следующие возможности:

- выбор типа аппроксимации;
- редактирование параметров работы;
- редактирование данных;
- запуск расчета;
- ВЫХОД.

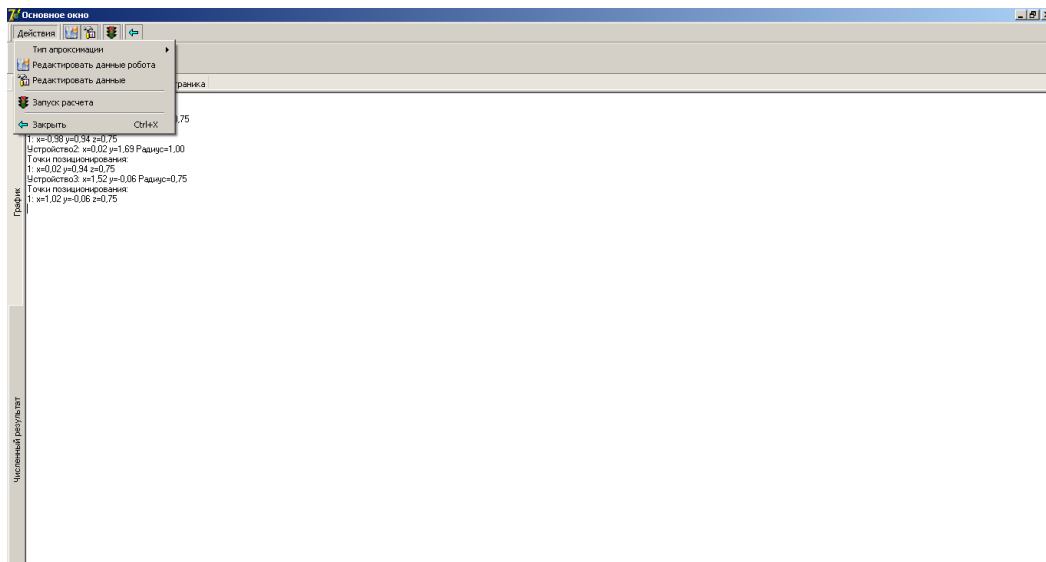


Рисунок 3.14 – Меню программы

Пункт меню «Тип аппроксимации» (рисунок 3.15) состоит из двух подпунктов: цилиндр и многоугольник, которые являются зависимыми переключателями, т.е можно выбрать только один из них. При выборе одного автоматически снимается галочка у другого.

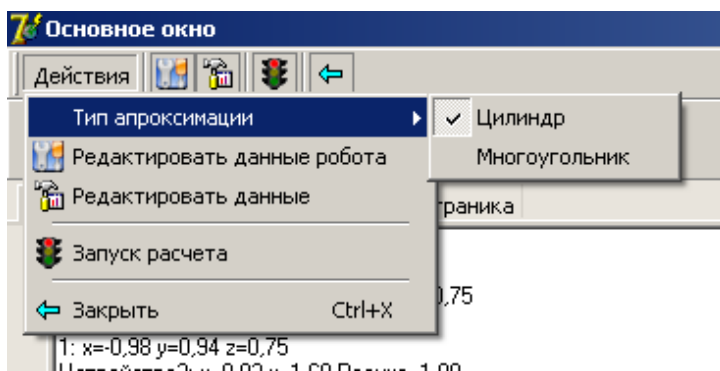


Рисунок 3.15 – Меню «Тип аппроксимации»

При выборе пункта меню «Редактировать данные робота» появляется следующая форма, для типа аппроксимации цилиндр (рисунок 3.16).

На данной форме доступны следующие группы параметров:

- общие параметры. В данной группе редактируется количество итераций и параметр дельта. Количество итераций можно задать или напрямую или с помощью кнопок, увеличивая или уменьшая с шагом один. Дельта вводится напрямую вводом соответствующего числа.

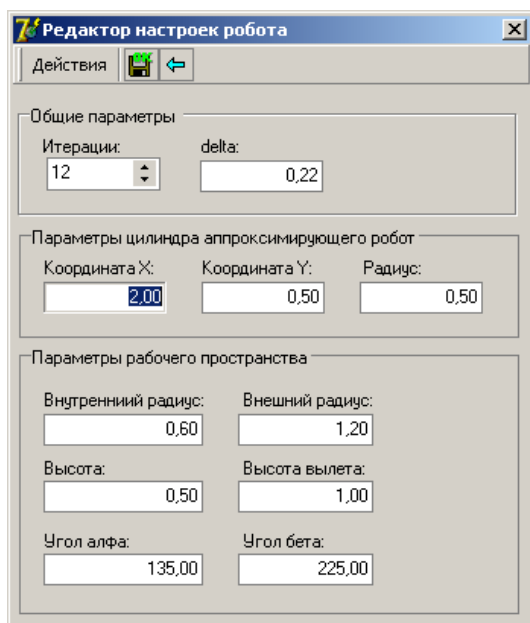


Рисунок 3.16 – Меню «Редактировать данные робота»

- параметры цилиндра аппроксимирующего робот. В этой группе задаются параметры цилиндра аппроксимирующего робот. К этим параметрам относятся две координаты по направлению x и по направлению y и радиус цилиндра. Все параметры вводятся напрямую в соответствующие поля.

- параметры рабочего пространства робота. В этой группе задаются параметры, характеризующие рабочее пространство робота. Это внутренний и внешний радиус, высота и высота вылета, и углы охвата альфа и бета. Все параметры вводятся напрямую в соответствующие поля.

Для сохранения результатов необходимо нажать на кнопку «Сохранить». При этом заданные параметры будут сохранены в файл, а также загружены в память программы. Для выхода без сохранения параметров необходимо нажать кнопку «Выход».

При выборе пункта меню «Редактировать данные» при условии, что выбран тип аппроксимации, цилиндр появится следующая форма, которая показана на рисунке 3.17.

В этой форме редактируется список устройств и точек позиционирования, которые отображаются в виде двухуровневого дерева, где на первом уровне находятся устройства, а на втором уровне точки позиционирования.

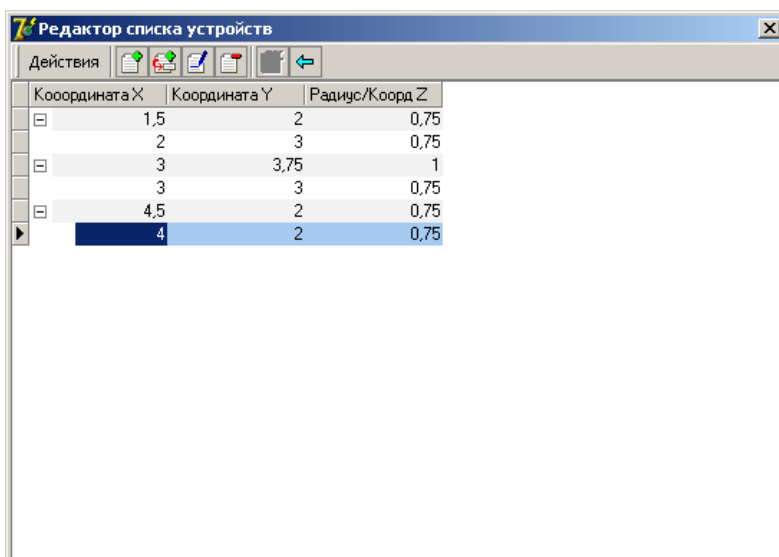



Рисунок 3.17 – Меню «Редактировать данные»

Для добавления нового устройства необходимо нажать кнопку «Добавить» . При этом появляется следующая форма (рисунок 3.18).

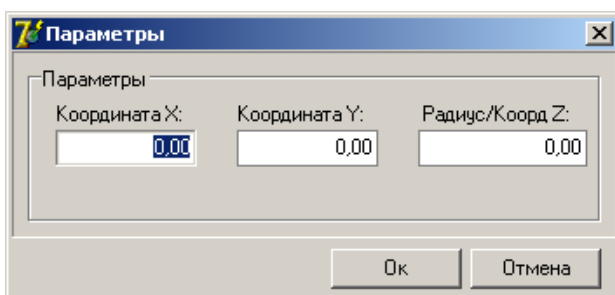





Рисунок 3.18 – Меню при нажатии кнопки «Добавить» 

На этой форме задаются значения координат x и y и радиус устройства. Для сохранения введенных данных необходимо нажать кнопку **Ок**. Если данные нет необходимости сохранять, то нажимается кнопка «Отмена».

Для редактирования ранее введенного устройства необходимо выбрать в таблице необходимое устройство и нажать кнопку «Изменить» . При редактировании отображается та же форма что и при добавлении, только с уже введенными данными устройства.

Для добавления точек привязки необходимо нажать кнопку «Добавить точку привязки» . В результате чего появляется следующая форма (рисунок 3.19).

В этой форме задается координаты x , y , z точки привязки.

Если при добавлении точки привязки было выделено устройство, то точка позиционирования добавляется как подчиненная к этому устройству. Если же была выделена точка привязки, то новая точка привязки добавляется на том же уровне и подчиненном тому же устройству.

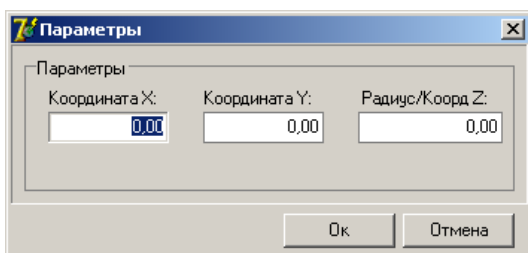





Рисунок 3.19 – Меню «Добавить точку привязки» 

Для редактирования ранее введенной точки привязки необходимо выбрать в таблице необходимую точку привязки и нажать кнопку «Изменить» . При редактировании отображается та же форма что и при добавлении, только с уже введенными данными.

Для удаления точки привязки необходимо выбрать в таблице нужную точку привязки и нажать кнопку «Удалить» . При этом будет запрошено подтверждение удаления (рисунок 3.20).

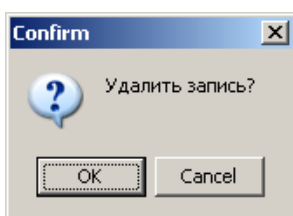



Рисунок 3.20 – Запрос на удаление точки привязки

Для подтверждения удаления необходимо нажать «ОК», для отмены необходимо нажать на кнопку «Cancel».

Для удаления устройства необходимо выбрать в таблице нужное устройство и нажать кнопку «Удалить» . При этом также будет запрошено подтверждение удаления. При удалении устройства выполняется проверка, есть ли у устройства введенные точки привязки. Если точек привязки нет, то устройство будет удалено, в противном случае будет выведено следующее сообщение (рисунок 3.21).

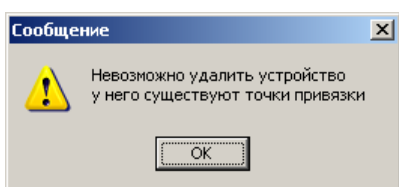



Рисунок 3.21 – Меню невозможности удаления устройства

Выход из режима редактирования устройств выполняется при нажатии на кнопку «Закрыть» . При этом проверяется условие, был ли список устройств или точек привязки изменен. В случае если изменений не было, то форма редактирования списка устройств закрывается. В противном случае выводится сообщение (рисунок 3.22).

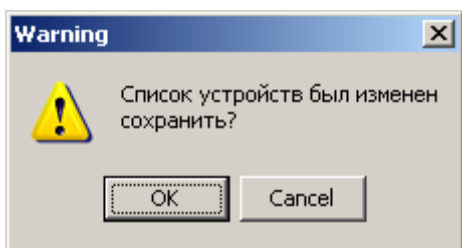




Рисунок 3.22 – Меню сохранения изменений

Если будет нажата кнопка «OK», то список устройств и точек привязки будет сохранен в файл. Если будет нажата кнопка «Cancel», то все изменения будут потеряны.

Также имеется возможность одновременного сохранения данных и выхода из режима редактирования списка устройств. Для этого необходимо нажать кнопку «Сохранить и выйти» . При выборе этой команды данные будут сохранены в файл и форма закроется. Данная кнопка по умолчанию неактивна и становится доступной для выполнения, только если данные были изменены.

Для расчета, для типа аппроксимации цилиндр, по приведенному выше алгоритму для цилиндра, необходимо нажать кнопку «Расчет» . При выборе этой команды из файла будут загружены введенные данные и выполнен расчет по алгоритму описанному выше. Результаты расчета отображаются в текстовом виде (рисунок 3.23).

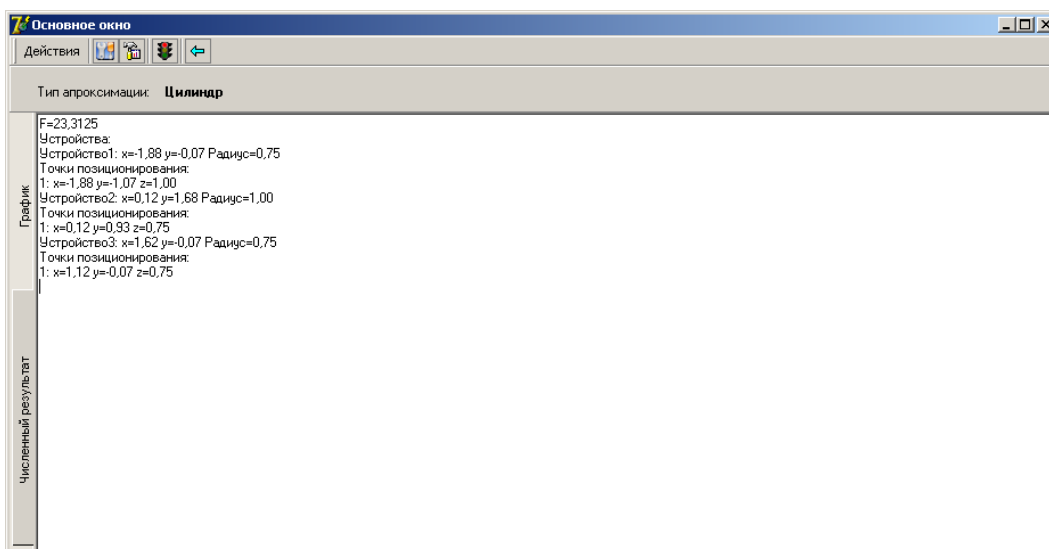


Рисунок 3.23 – Результаты расчета при аппроксимации элементов РТК прямоугольными цилиндрами

С применением данной программы рассмотрим задачу построения КС РТЯ снятия оксидной пленки с поверхности расплавов свинца и цинка залитых в неподвижные изложницы КРМ. Для этого аппроксимируем КРМ (рисунок 1.1) и его элементы окружностями (рисунок 3.24).

На рисунке 3.24 показана КС РТК снятия оксидной пленки с поверхности расплавов свинца и цинка залитых в неподвижные изложницы КРМ. На этом рисунке ПР 4 при помощи скребков снимает оксидную пленку

с поверхности расплава, залитого в изложницы 5. В изложницы 5 расплав заливается при помощи устройства 2. Готовые застывшие чушки, вынимаются из изложниц при помощи устройства 3.

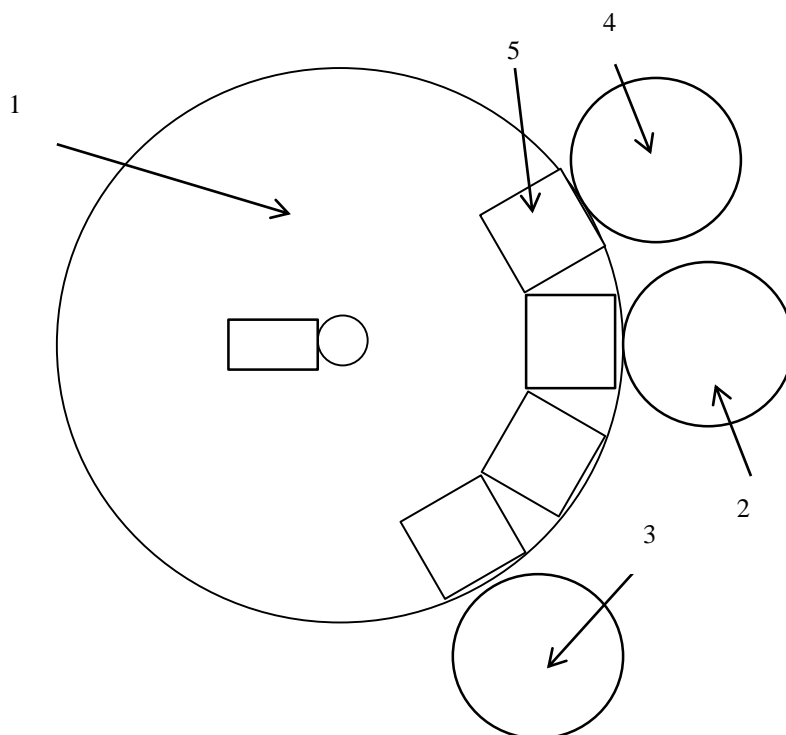


Рисунок 3.24 – Компонировочная схема РТК снятия оксидной пленки с поверхности неподвижных изложниц КРМ

Применение аппроксимации элементов КРМ и ПР прямоугольными цилиндрами в данном случае приводит к желаемому результату.

Рассмотрим процедуру построения КС РТК производства товарного магния. В этом случае задача решается в два этапа. На первом этапе разрабатывается КС РТЯ переброса струи металлического расплава из одной изложницы в другую. Затем считая, что ПР для переброса металла между стыками изложниц, является элементом ЛК, разрабатывается КС РТЯ снятия оксидной пленки с поверхности магниевой расплава залитого в движущиеся изложницы ЛК.

На рисунке 3.25 показана КС РТЯ переброса струи металлического расплава из одной изложницы в другую. На этом рисунке ЛК аппроксимируется множеством пересекающихся окружностей 1. Магниевый расплав заливается в движущиеся изложницы, установленные на ЛК 1 из наклонного тигля 2. В данном случае наклонный тигель не представляет помех для установки роботов. С учетом этого обстоятельства ПР для переброса струи металлического расплава, из одной изложницы в другую 3 привязан своим местоположением к ЛК. Условия взаимного не пересечения окружностей аппроксимирующих ЛК не выполняются, но формально, можно не обращать внимание на это обстоятельство. Будем проверять только

условие взаимного не пересечения окружности аппроксимирующей ПР, с каждой окружностью аппроксимирующей ЛК.

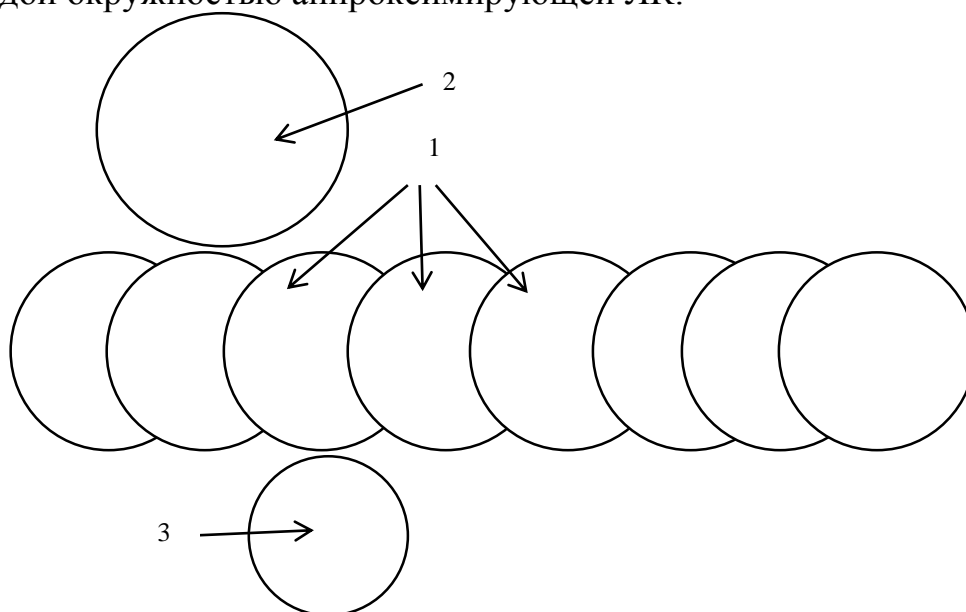


Рисунок 3.25 – КС РТЯ переброса струи магниевого расплава между стыками движущихся изложниц ЛК

Далее считаем, что и ПР для переброса струи металлического расплава из одной изложницы 3 представляет собой элемент ЛК. Это служит первоначальным расположением элементов ЛК для построения КС РТЯ снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава, залитого в движущиеся изложницы ЛК.

Тогда необходимо привязать по местоположению ПР для снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава, залитого в движущиеся изложницы ЛК. В результате получится КС РТЯ снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава, залитого в движущиеся изложницы ЛК. Но с учетом, что на этой схеме показаны КС двух РТЯ, получим КС РТК производства товарного магния (рисунок 3.26).

Как видно из вышеизложенного, в случае вытянутых форма, аппроксимация элементов РТК, становится приближенной, приходится вводит пересекающиеся друг с другом окружности, что усложняет алгоритм построения КС РТК.

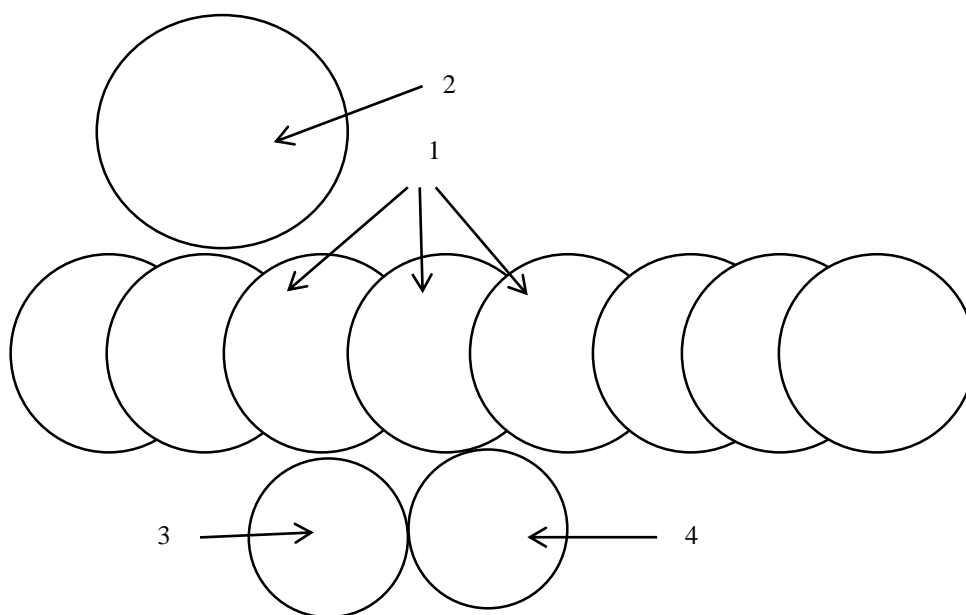


Рисунок 3.26 – КС РТК производства товарного магния

ВЫВОДЫ

1. Разработано формализованное описание КС РТК при аппроксимации ПР и ТВО прямоугольными цилиндрами, имеющими на плоскости производственной площади проекции в виде окружностей.

2. Поставлена задача построения КС РТК в виде задачи оптимизации с функционалом минимизации расстояний между центрами окружностями аппроксимирующих ПР и ТВО, выполнения условий взаимного не пересечения этих окружностей и охвата РП ПР всех требуемых точек позиционирования схвата ПР.

3. Разработан алгоритм построения КС РТК производства товарного свинца, цинка и магния, при аппроксимации элементов РТК прямоугольными цилиндрами.

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ РТК ПРИ АППРОКСИМАЦИИ ЕЁ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ПРИЗМАМИ

Компоновочная схема (КС) роботизированного технологического комплекса (РТК) представляет собой схему размещения промышленного робота (ПР), технологического и вспомогательного оборудования (ТВО) на производственной площади [35, 36, 71, 72]. При этом должно быть исключено взаимное столкновение технологического, вспомогательного оборудования и промышленного робота (ПР) между собой, а также все требуемые точки позиционирования, заданные траектории движения схвата или рабочего органа должны принадлежать РП робота [127]. Задача построения КС РТК может быть решена как в аналитической форме, так и с применением графических методов [32, 44].

4.1 Формализованное описание компоновочной схемы РТК при аппроксимации её элементов прямоугольными призмами

Для упрощения задачи аппроксимируем ПР, ТВО прямоугольными призмами, которые на плоскости OXY , имеют проекции в виде выпуклых многоугольников. Расположим все элементы РТК, аппроксимированные многоугольниками, в первом квадранте системы координат OXY , как показано на рисунке 4.1.

Каждый многоугольник зададим точками вершин $A_j^i(x_j^i, y_j^i)$, где $i = \overline{1, m}$, – порядковый номер многоугольника, аппроксимирующего одно ТВО, m – количество единиц ТВО, $j = \overline{1, n_i}$ – порядковый номер вершины i -того многоугольника, n_i – количество вершин i -того многоугольника. К каждому i -тому многоугольнику привязаны требуемые точки позиционирования $B_k^i(x_k^i, y_k^i, z_k^i)$, где $k = \overline{1, p_i}$ – порядковый номер точки позиционирования, p_i – количество точек позиционирования, привязанных к i -тому многоугольнику. Взаимное расположение ТВО, определяется заданной технологической цепочкой. Изменение заданного взаимного расположения ТВО, как правило, не допустимо.

Определим средние точки $A_i(x_i^ц, y_i^ц)$, $i = \overline{1, m}$, где m – количество единиц применяемого оборудования, многоугольников аппроксимирующих ТВО следующим образом:

$$x_i^ц = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} x_j^i}{n_i}, y_i^ц = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_j^i}{n_i}. \quad (4.1)$$

Алгоритм решения задачи, определения средних точек многоугольников аппроксимирующих ТВО, можно представить в виде процедуры ОСТО, блок-схема которой показана на рисунке 4.2. Исходными данными для решения данной задачи являются вершины многоугольников аппроксимирующих ТВО $A_j^i(x_j^i, y_j^i)$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n_i}$. Во внутреннем цикле

вычисляется значения сумм координат $\sum_{j=1}^{n_i} x_j^i$ и $\sum_{j=1}^{n_i} y_j^i$. При выходе из цикла определяются координата $A_i(x_i^H, y_i^H)$ средней точки, соответствующего многоугольника.

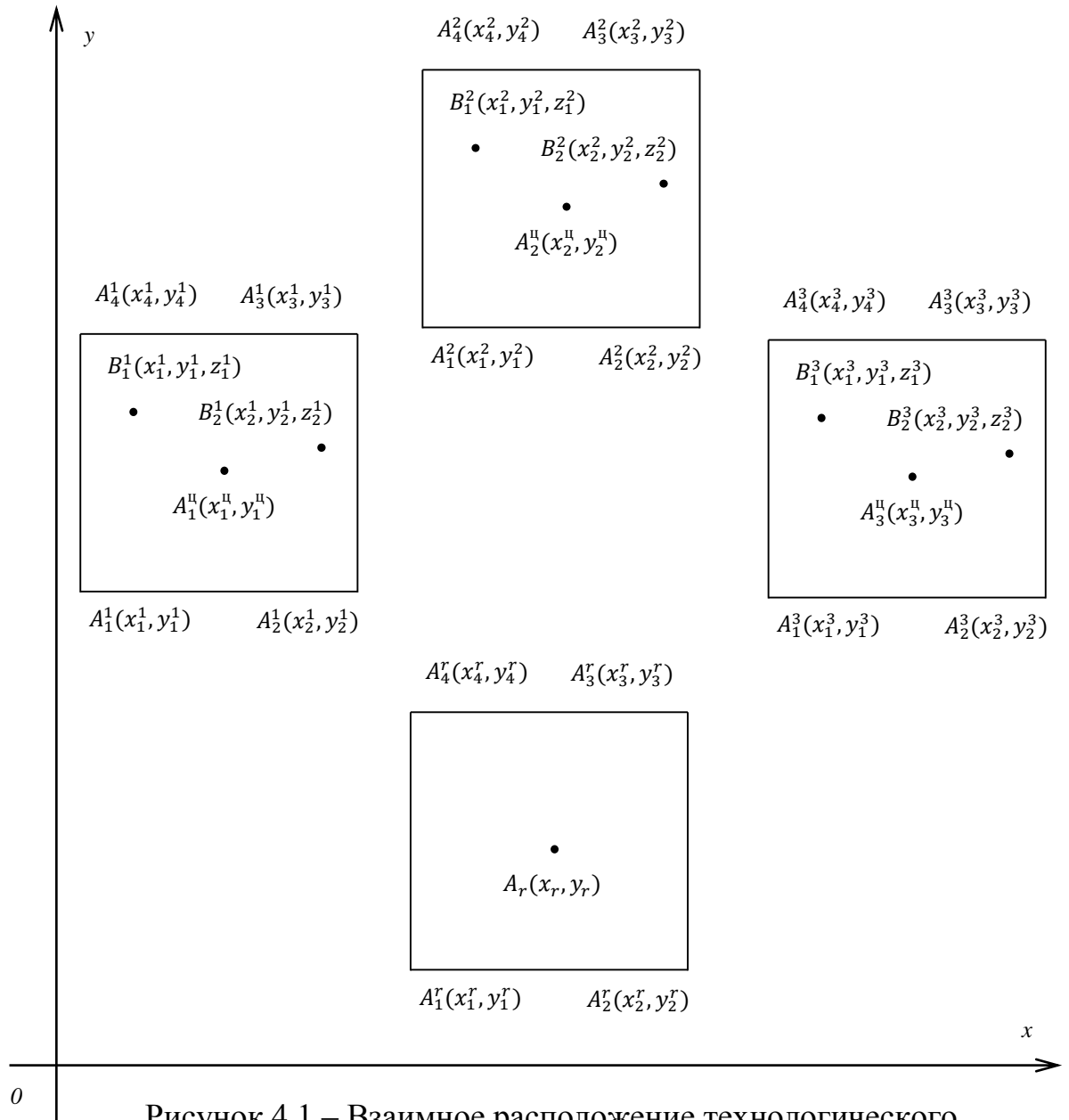


Рисунок 4.1 – Взаимное расположение технологического, вспомогательного оборудования и промышленного робота

Внешний цикл осуществляет переход к следующему многоугольнику. Выходными данными процедуры ОСТО являются координаты всех средних точек многоугольников аппроксимирующих ТВО.

ПР также аппроксимируем многоугольником с вершинами $A_l^r(x_l^r, y_l^r)$, где $l = \overline{1, m_r}$ – порядковый номер вершины многоугольника, аппроксимирующего ПР, m_r – количество вершин многоугольника, аппроксимирующего ПР.

Зададим среднюю точку $A_r(x_r, y_r)$, многоугольника аппроксимирующего ПР

$$x_r = \frac{\sum_{l=1}^{m_r} x_l^r}{m_r}, y_r = \frac{\sum_{l=1}^{m_r} y_l^r}{m_r}. \quad (4.2)$$

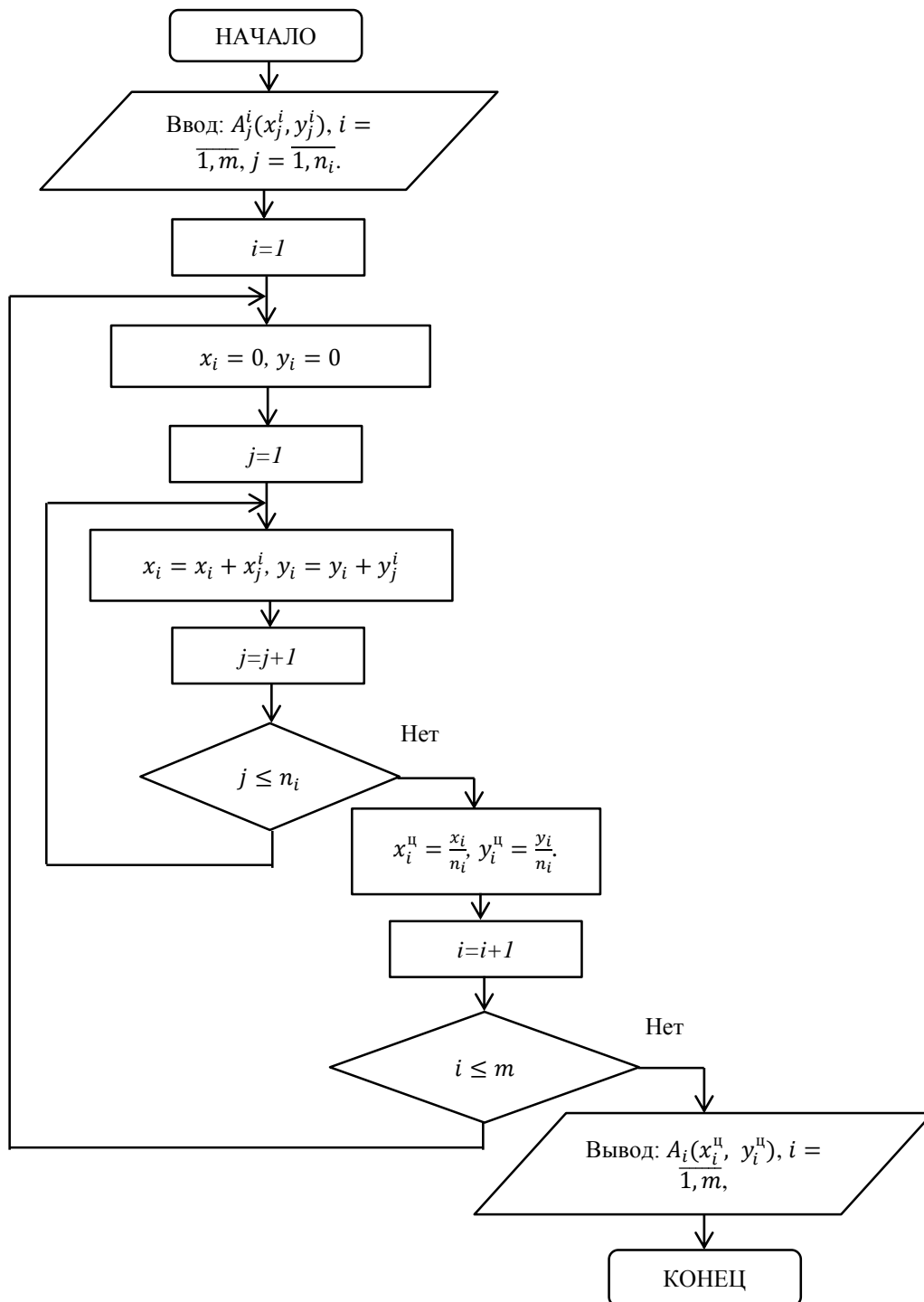


Рисунок 4.2 – Блок-схема процедуры ОСТО

Алгоритм решения задачи определения средних точек многоугольника аппроксимирующего ПР можно представить в виде процедуры ОСТПР, блок-схема которой показана на рисунке 4.3. Исходными данными для решения данной задачи являются вершины многоугольника аппроксимирующего ПР $A_l^r(x_l^r, y_l^r)$, $l = \overline{1, m_r}$. В цикле вычисляются значения сумм координат $\sum_{l=1}^{m_r} x_l^r$ и $\sum_{l=1}^{m_r} y_l^r$. При выходе из цикла определяются координата $A_r(x_r, y_r)$

средней точки. Выходными данными процедуры ОСТПР являются координаты средней точки многоугольника аппроксимирующего ПР.

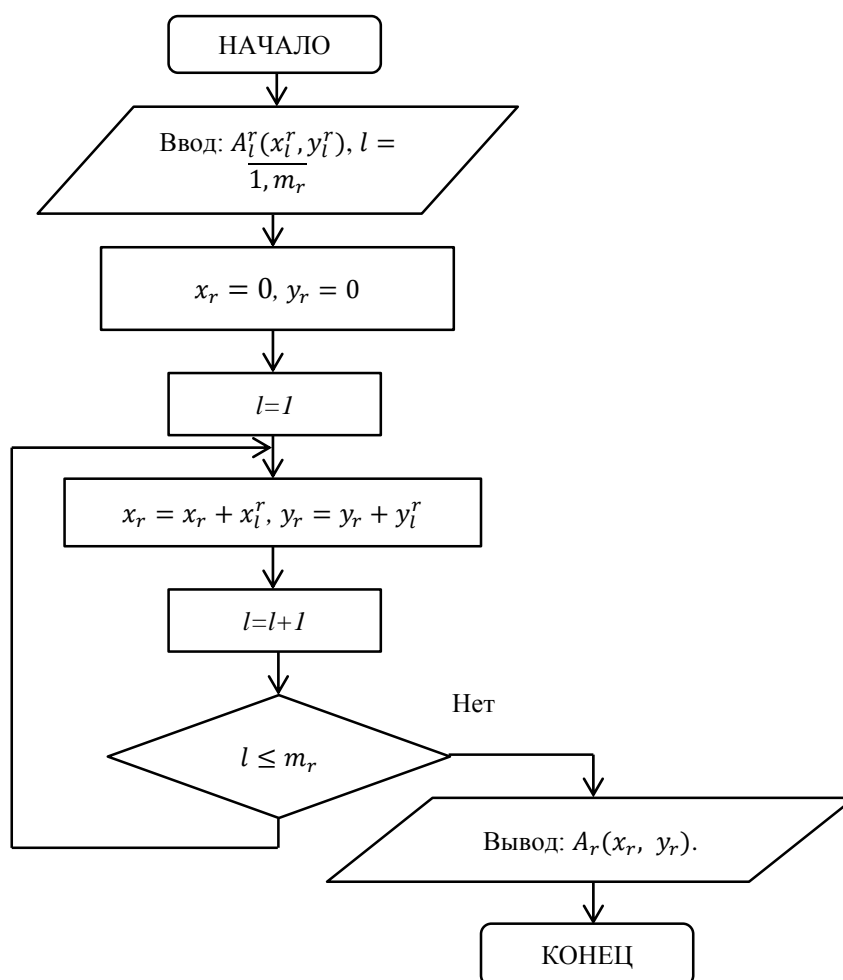


Рисунок 4.3 – Блок-схема процедуры ОСТПР

РП ПР опишем R – функцией [67]. Описание РП в виде логических выражений R – функций, рассмотрено в работе [69].

Условие принадлежности всех требуемых точек позиционирования, заданных траектории движения схвата или рабочего органа РП ПР запишем в виде:

$$\forall B_k^i(x_k^i, y_k^i, z_k^i), i = \overline{1, m}, k = \overline{1, p_i}$$

$$(D_1(x, y, z) \geq 0)L^r(D_2(x, y, z) \geq 0)L^r \dots L^r(D_n(x, y, z) \geq 0) = 1. \quad (4.3)$$

где $D_j(x, y, z) \geq 0, (j=1, 2, \dots, r), j$ – тая часть пространства, ограниченная элементарной поверхностью, описывающейся простейшим неравенством, задающим или аппроксимирующим границу РП ПР,

r – число элементарных поверхностей.

Задачу построения КС представим в виде задачи определения такого взаимного расположения ТВО и ПР с минимизацией производственной площади РТК. Пусть будут заданы взаимные расположения ТВО. Варьируемым параметром является точка установки ПР. При этом все требуемые точки позиционирования схвата должны принадлежать РП ПР. С

учетом условия размещения ТВО и ПР и их аппроксимации прямоугольными призмами, задача оптимизации решается на плоскости координат OXY .

4.2 Логические условия взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО

Каждый многоугольник аппроксимирующий i -тое ТВО опишем в виде логического выражения, R – функции [67]. Для получения данного логического выражения соединим две соседние вершины $A_j^i(x_j^i, y_j^i)$ и $A_{j+1}^i(x_{j+1}^i, y_{j+1}^i)$ отрезками, так последняя вершина соединяется отрезком с первой вершиной, то необходимо задать первую вершину второй раз как соседнюю с последней вершиной $A_{n_i+1}^i(x_{n_i+1}^i, y_{n_i+1}^i) = A_1^i(x_1^i, y_1^i)$ ($j = \overline{1, n_i}$). Данные отрезки лежат на прямых линиях, описываемых уравнением [129]:

$$\frac{x-x_j^i}{x_{j+1}^i-x_j^i} = \frac{y-y_j^i}{y_{j+1}^i-y_j^i},$$

или

$$a_{j,1}^i x + a_{j,2}^i y + a_{j,3}^i = 0, \quad (4.4)$$

$$\text{где: } \begin{cases} a_{j,1}^i = y_{j+1}^i - y_j^i, \\ a_{j,2}^i = -(x_{j+1}^i - x_j^i), \\ a_{j,3}^i = -[x_j^i(y_{j+1}^i - y_j^i) + y_j^i(x_{j+1}^i - x_j^i)]. \end{cases} \quad (4.5)$$

Каждый i -тый многоугольник представим в виде пересечения полуплоскостей, образованных прямыми проходящими через две соседние вершины

$$a_{j,1}^i x + a_{j,2}^i y + a_{j,3}^i \geq 0. \quad (4.6)$$

Используя (4.4) и координаты точки $A_i(x_i^u, y_i^u)$ (4.1) проверяем истинность следующего логического выражения:

$$\left(\exists A_i^u(x_i^u, y_i^u) \right), a_{j,1}^i x_i^u + a_{j,2}^i y_i^u + a_{j,3}^i \geq 0. \quad (4.7)$$

Если данное выражение истинно, то коэффициенты (4.6) определяются выражением (4.5), в противном случае знаки коэффициентов в выражении (4.6) меняются на противоположные. Алгоритм решения задачи (4.7) представим в виде процедуры ОПКТО, определения коэффициентов описывающих полуплоскости (4.6), задающих боковые линии многоугольника аппроксимирующего i -тое оборудование. Блок – схема этой процедуры представлена на рисунке 4.4.

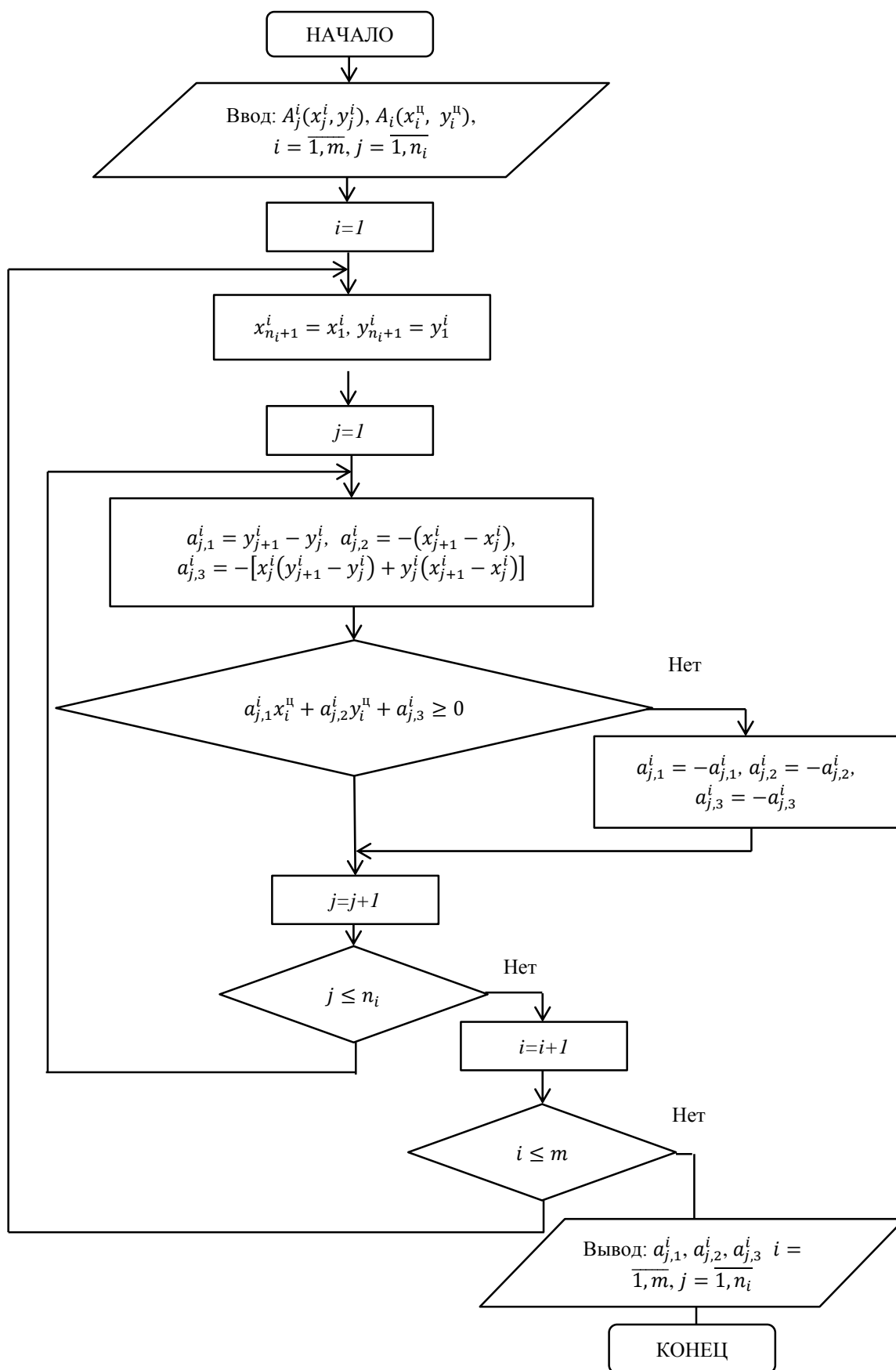


Рисунок 4.4 – Блок-схема процедуры ОПКТО

Для реализации процедуры ОПКТО необходимо ввести координаты точек вершин i – того многоугольника и средних точек (4.1). Далее

определяются коэффициенты $a_{j,1}^i, a_{j,2}^i, a_{j,3}^i$ $i = \overline{1, m}$, по выражению (4.5). Данные коэффициенты определяют прямую (4.4), соединяющую соседние вершины i – того многоугольника. На основании проверки логического условия (4.7), корректируются знаки коэффициентов (5).

Определим логические переменные, задающие каждую полуплоскость вида (4.6)

$$L_j^i = \begin{cases} 1, & \text{если } a_{j,1}^i x + a_{j,2}^i y + a_{j,3}^i \geq 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4.8)$$

Тогда многоугольник аппроксимирующий i – тое ТВО зададим в виде следующей Булевой функции:

$$\bigcap_{j=1}^{j=n_i} L_j^i = 1. \quad (4.9)$$

На основании Булевой функции (4.9) и условий получения логических переменных (4.8), можно сформировать R – функцию задающую многоугольник аппроксимирующий i – тое технологическое или вспомогательное оборудование:

$$\begin{aligned} & (a_{1,1}^i x + a_{1,2}^i y + a_{1,3}^i \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^i x + a_{2,2}^i y + a_{2,3}^i \geq 0) \cap_1 \dots \\ & \cap_1 (a_{n_i,1}^i x + a_{n_i,2}^i y + a_{n_i,3}^i \geq 0) = 1. \end{aligned} \quad (4.10)$$

В логическом выражении (4.10) знак логической операции \cap конъюнкция заменен на знак логической операции \cap_1 , соответствующий R – конъюнкция.

Учитывая, что в составе РТК имеется m единиц ТВО, их взаимное расположение зададим объединением логических условий (4.9):

$$\bigcup_{i=1}^m \left(\bigcap_{j=1}^{j=n_i} L_j^i \right) = 1. \quad (11)$$

На основании Булевой функции (4.11) можно сформировать R – функцию, задающую взаимное расположение многоугольников аппроксимирующих ТВО:

$$\begin{aligned} & \left((a_{1,1}^1 x + a_{1,2}^1 y + a_{1,3}^1 \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^1 x + a_{2,2}^1 y + a_{2,3}^1 \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{n_1,1}^1 x + a_{n_1,2}^1 y + a_{n_1,3}^1 \geq 0) \right) \cup_1 \\ & \left((a_{1,1}^2 x + a_{1,2}^2 y + a_{1,3}^2 \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^2 x + a_{2,2}^2 y + a_{2,3}^2 \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{n_2,1}^2 x + a_{n_2,2}^2 y + a_{n_2,3}^2 \geq 0) \right) \cup_1 \dots \cup_1 \\ & \left((a_{1,1}^m x + a_{1,2}^m y + a_{1,3}^m \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^m x + a_{2,2}^m y + a_{2,3}^m \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{n_m,1}^m x + a_{n_m,2}^m y + a_{n_m,3}^m \geq 0) \right) = 1. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Многоугольник аппроксимирующий ПР, также зададим в виде пересечения полуплоскостей (4.6), образованных прямыми проходящими через две соседние вершины $A_k^r(x_k^r, y_k^r)$ и $A_{k+1}^r(x_{k+1}^r, y_{k+1}^r)$, при условии что последняя точка вершины соединяется с первой вершиной боковым отрезком $A_{m_r+1}^r(x_{m_r+1}^r, y_{m_r+1}^r) = A_1^r(x_1^r, y_1^r)$, ($k = \overline{1, m_r}$)

$$a_{k,1}^r x + a_{k,2}^r y + a_{k,3}^r \geq 0, \quad (4.13)$$

$$\text{где: } \begin{cases} a_{k,1}^r = y_{k+1}^r - y_k^r, \\ a_{k,2}^r = -(x_{k+1}^r - x_k^r), \\ a_{k,3}^r = -[x_k^r(y_{k+1}^r - y_k^r) + y_k^r(x_{k+1}^r - x_k^r)]. \end{cases} \quad (4.14)$$

Если истинно следующее логическое выражение:

$$(\exists A_r(x_r, y_r)), a_{k,1}^r x_r + a_{k,2}^r y_r + a_{k,3}^r \geq 0, \quad (4.15)$$

то коэффициенты (4.13) определяются выражением (4.14), в противном случае знаки коэффициентов в выражении (4.14) меняются на противоположные.

Алгоритм решения задачи (4.15) представим в виде процедуры ОПКПР, определения коэффициентов описывающих полуплоскости (4.13), задающих боковые отрезки многоугольника аппроксимирующего ПР. Блок – схема этой процедуры подобна процедуре ОПКТО (рисунок 4.5). Для реализации процедуры ОПКПР необходимо ввести координаты точек вершин многоугольника аппроксимирующего ПР $A_k^r(x_k^r, y_k^r)$ ($k = \overline{1, m_r + 1}$) и значение средней точки (1). Вершина $A_{m_r+1}^r(x_{m_r+1}^r, y_{m_r+1}^r) = A_1^r(x_1^r, y_1^r)$. Далее определяются коэффициенты $a_{k,1}^r, a_{k,2}^r, a_{k,3}^r$ $i = \overline{1, m_r}$, согласно выражения (4.14). На основании проверки логического условия (4.15), в случае необходимости корректируются знаки коэффициентов (4.14). Выходными данными процедуры ОПКТО будут значения коэффициентов $a_{k,1}^r, a_{k,2}^r, a_{k,3}^r$ $i = \overline{1, m_r}$.

Определим логические переменные, задающие полуплоскости вида (4.13)

$$L_k^r = \begin{cases} 1, \text{ если } a_{k,1}^r x + a_{k,2}^r y + a_{k,3}^r \geq 0, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (4.16)$$

Тогда многоугольник аппроксимирующий ПР зададим в виде следующей логической функции:

$$\bigcap_{k=1}^{k=m_r} L_k^r = 1. \quad (4.17)$$

На основании Булевой функции (4.17) можно сформировать R – функцию задающую многоугольник аппроксимирующий ПР:

$$\left((a_{1,1}^r x + a_{1,2}^r y + a_{1,3}^r \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^r x + a_{2,2}^r y + a_{2,3}^r \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{m_r,1}^r x + a_{m_r,2}^r y + a_{m_r,3}^r \geq 0) \right) = 1. \quad (4.18)$$

Условия взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих ТВО (4.11) с многоугольником аппроксимирующем ПР (4.17) представим в виде следующего логического условия:

$$\left(\bigcap_{k=1}^{k=m_r} L_k^r \right) \cap \left(\bigcup_{i=1}^m \left(\bigcap_{j=1}^{j=n_i} L_j^i \right) \right) = 0. \quad (4.19)$$

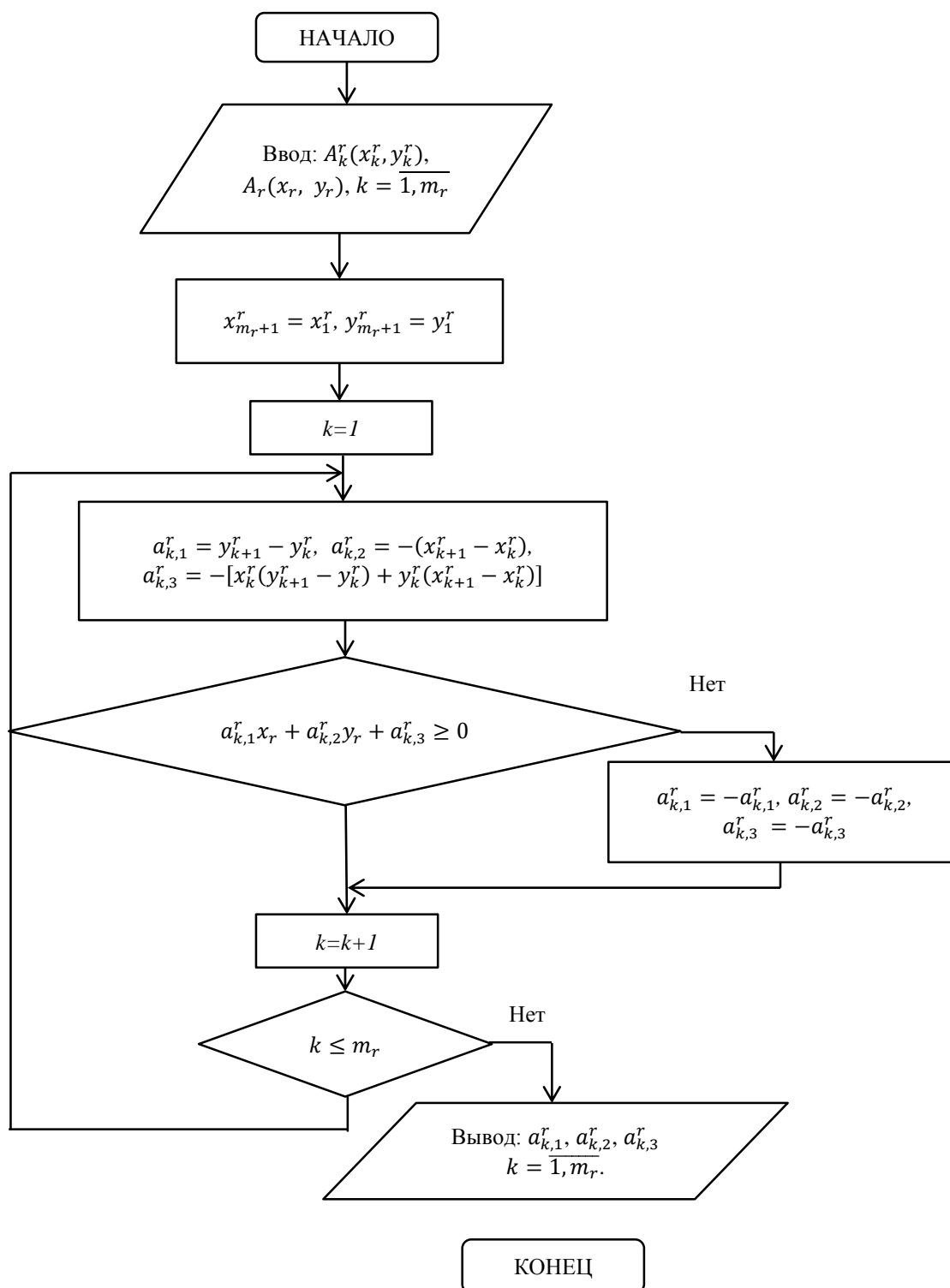


Рисунок 4.5 – Блок-схема процедуры ОПКПР

Логическое условие (4.19) можно представить в виде R – функции:

$$\begin{aligned}
 & \left((a_{1,1}^1 x + a_{1,2}^1 y + a_{1,3}^1 \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^1 x + a_{2,2}^1 y + a_{2,3}^1 \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{n_1,1}^1 x + a_{n_1,2}^1 y + a_{n_1,3}^1 \geq 0) \right) \cup_1 \left((a_{1,1}^2 x + a_{1,2}^2 y + a_{1,3}^2 \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^2 x + a_{2,2}^2 y + a_{2,3}^2 \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{n_i,1}^2 x + a_{n_i,2}^2 y + a_{n_i,3}^2 \geq 0) \right) \cup_1 \dots \cup_1 \left((a_{1,1}^m x + a_{1,2}^m y + a_{1,3}^m \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^m x + a_{2,2}^m y + a_{2,3}^m \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{n_m,1}^m x + a_{n_m,2}^m y + a_{n_m,3}^m \geq 0) \right)
 \end{aligned}$$

$$0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{n_i,1}^m x + a_{n_i,2}^m y + a_{n_i,3}^m \geq 0)) \cap_1 ((a_{1,1}^r x + a_{1,2}^r y + a_{1,3}^r \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^r x + a_{2,2}^r y + a_{2,3}^r \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{m_r,1}^r x + a_{m_r,2}^r y + a_{m_r,3}^r \geq 0)) = 0 .$$

(4.20)

4.3 Разработка алгоритма построения компоновочных схем РТК при аппроксимации её элементов прямоугольными призмами

Задачу минимизации производственной площади (3.1) занимаемой РТК, представим в виде задачи минимизации суммы расстояний между ТВО и ПР:

$$\sum_{i=1}^{i=m} (x_r - x_i^u)^2 + (y_r - y_i^u)^2 \rightarrow 0, \quad (4.21)$$

при ограничениях (4.3) и (4.20).

Ограничение (4.3) является условием охвата РП всех требуемых точек позиционирования рабочего органа ПР. Для решения данной задачи необходимо найти такое взаимное расположение ПР относительно требуемых точек позиционирования, при котором они охватываются рабочим пространством

Ограничение (4.20) является условием взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих ТВО и ПР. Определение логического условия (4.20) для заданного расположения многоугольников трудноразрешимая задача.

Упростим эту задачу и будем определять последовательно пересечение каждого многоугольника аппроксимирующего i – тое ТВО (4.9) с многоугольником аппроксимирующим ПР (4.14)

$$(\cap_{k=1}^{k=m_r} L_k^r) \cap (\cap_{j=1}^{j=n_i} L_j^i) = 0. \quad (4.22)$$

Учитывая, что многоугольники выпуклые, условие взаимного не пересечение двух многоугольников (4.22) представим в виде

$$\left((a_{1,1}^i x + a_{1,2}^i y + a_{1,3}^i \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^i x + a_{2,2}^i y + a_{2,3}^i \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{n_i,1}^i x + a_{n_i,2}^i y + a_{n_i,3}^i \geq 0) \right) \cap_1 \left((a_{1,1}^r x + a_{1,2}^r y + a_{1,3}^r \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^r x + a_{2,2}^r y + a_{2,3}^r \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{m_r,1}^r x + a_{m_r,2}^r y + a_{m_r,3}^r \geq 0) \right) = 0.$$

(4.23)

Для определения случая взаимного не пересечения выпуклых многоугольников аппроксимирующих ПР и i – тое ТВО на основе логического условия (4.23), трудно разрешимо так как требует анализа бесконечного множества значений координат x, y, z . Для практической реализации логического условия (4.23) учтем, что рассматриваемые многоугольники выпуклые (рисунок 4.11).

В случае пересечения двух выпуклых многоугольников, хотя бы одна вершина многоугольника должна располагаться внутри другого многоугольника (рисунок 4.6). Логическое условие непринадлежности вершин многоугольника аппроксимирующего i – тое ТВО многоугольнику

аппроксимирующему ПР запишется в виде:

$$\forall (A_j^i(x_j^i, y_j^i)), j = \overline{1, n_i}: ((a_{1,1}^r x_j^i + a_{1,2}^r y_j^i + a_{1,3}^r \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^r x_j^i + a_{2,2}^r y_j^i + a_{2,3}^r \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{m_r,1}^r x_j^i + a_{m_r,2}^r y_j^i + a_{m_r,3}^r \geq 0)) = 0. \quad (4.24)$$

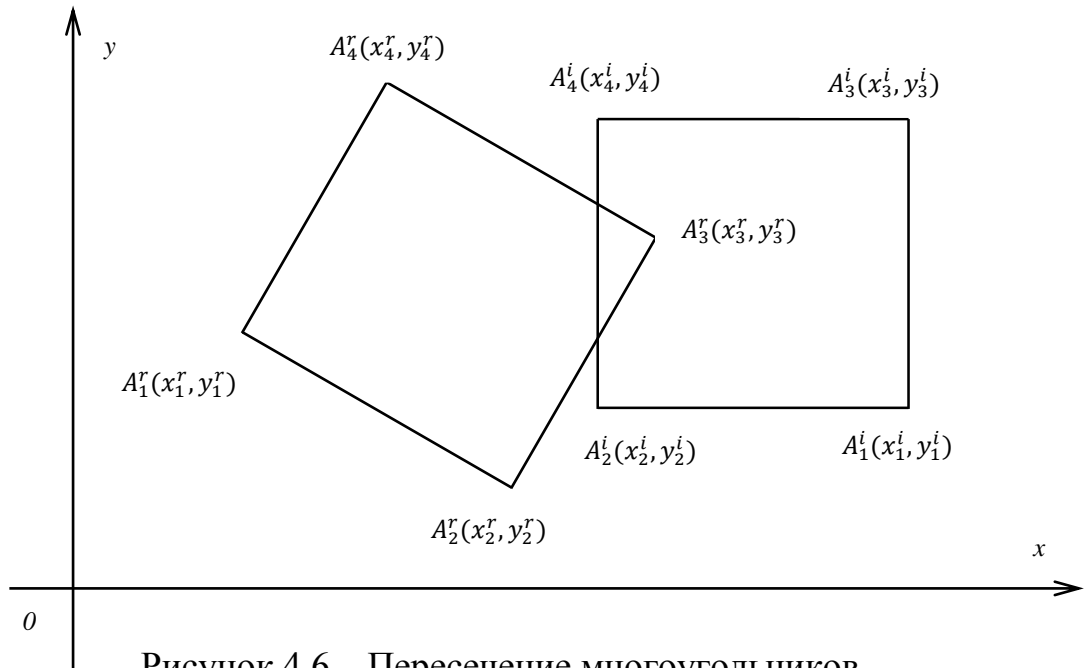


Рисунок 4.6 – Пересечение многоугольников аппроксимирующих i – тое оборудование и ПР

Логическое условие непринадлежности вершин многоугольника аппроксимирующего ПР многоугольнику аппроксимирующему i – тое ТВО запишется в виде:

$$\forall (A_k^r(x_k^r, y_k^r)), k = \overline{1, m_r}: (a_{1,1}^i x_k^r + a_{1,2}^i y_k^r + a_{1,3}^i \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^i x_k^r + a_{2,2}^i y_k^r + a_{2,3}^i \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{n_i,1}^i x_k^r + a_{n_i,2}^i y_k^r + a_{n_i,3}^i \geq 0) = 0. \quad (4.25)$$

С учетом логических условий (4.24) и (4.25), логическое условие взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих ТВО с многоугольником аппроксимирующем ПР (4.20) может быть представлено в виде:

$$\left(\forall (A_j^i(x_j^i, y_j^i)), j = \overline{1, n_i}: ((a_{1,1}^r x_j^i + a_{1,2}^r y_j^i + a_{1,3}^r \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^r x_j^i + a_{2,2}^r y_j^i + a_{2,3}^r \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{m_r,1}^r x_j^i + a_{m_r,2}^r y_j^i + a_{m_r,3}^r \geq 0)) \right) \cup_1 \left(\forall (A_k^r(x_k^r, y_k^r)), k = \overline{1, m_r}: (a_{1,1}^i x_k^r + a_{1,2}^i y_k^r + a_{1,3}^i \geq 0) \cap_1 (a_{2,1}^i x_k^r + a_{2,2}^i y_k^r + a_{2,3}^i \geq 0) \cap_1 \dots \cap_1 (a_{n_i,1}^i x_k^r + a_{n_i,2}^i y_k^r + a_{n_i,3}^i \geq 0) \right) = 0. \quad (4.26)$$

Для реализации логического условия (4.26) разработана процедура ОПТОПР, блок-схема которой приведена на рисунке 4.7.

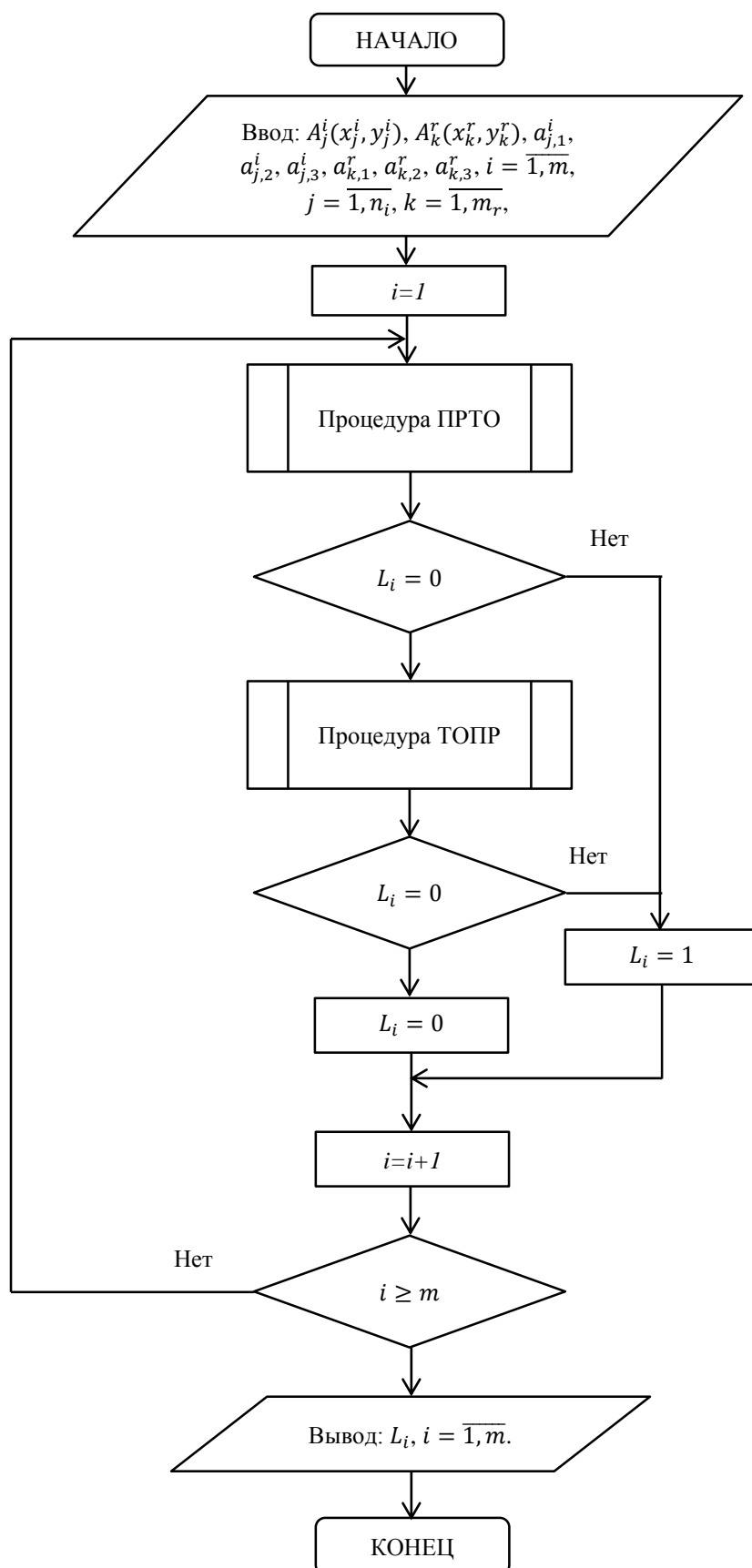


Рисунок 4.7 – Блок – схема процедуры ОПТОПР

Для решения этой задачи вводятся координаты вершин многоугольников аппроксимирующих ПР $A_k^r(x_k^r, y_k^r)$, и технологическое и вспомогательное

оборудования $A_j^i(x_j^i, y_j^i)$, коэффициенты $a_{j,1}^i, a_{j,2}^i, a_{j,3}^i, i = \overline{1, m}$, которые определяются при помощи процедуры ОПКТО (рисунок 4.2), коэффициенты $a_{k,1}^r, a_{k,2}^r, a_{k,3}^r, k = \overline{1, m_r}$, которые определяются при помощи процедуры ОПКПР (рисунок 4.5). Это входные данные процедур ПРТО и ТОПР.

Блок-схема процедуры ПРТО приведена на рисунке 4.8. Процедура ПРТО предназначена для определения принадлежности вершин многоугольника i – того ТВО $A_j^i(x_j^i, y_j^i)$, многоугольнику аппроксимирующего ПР, который задается полуплоскостями на основе значений коэффициентов $a_{k,1}^r, a_{k,2}^r, a_{k,3}^r, k = \overline{1, m_r}$, логическое условие (4.24).

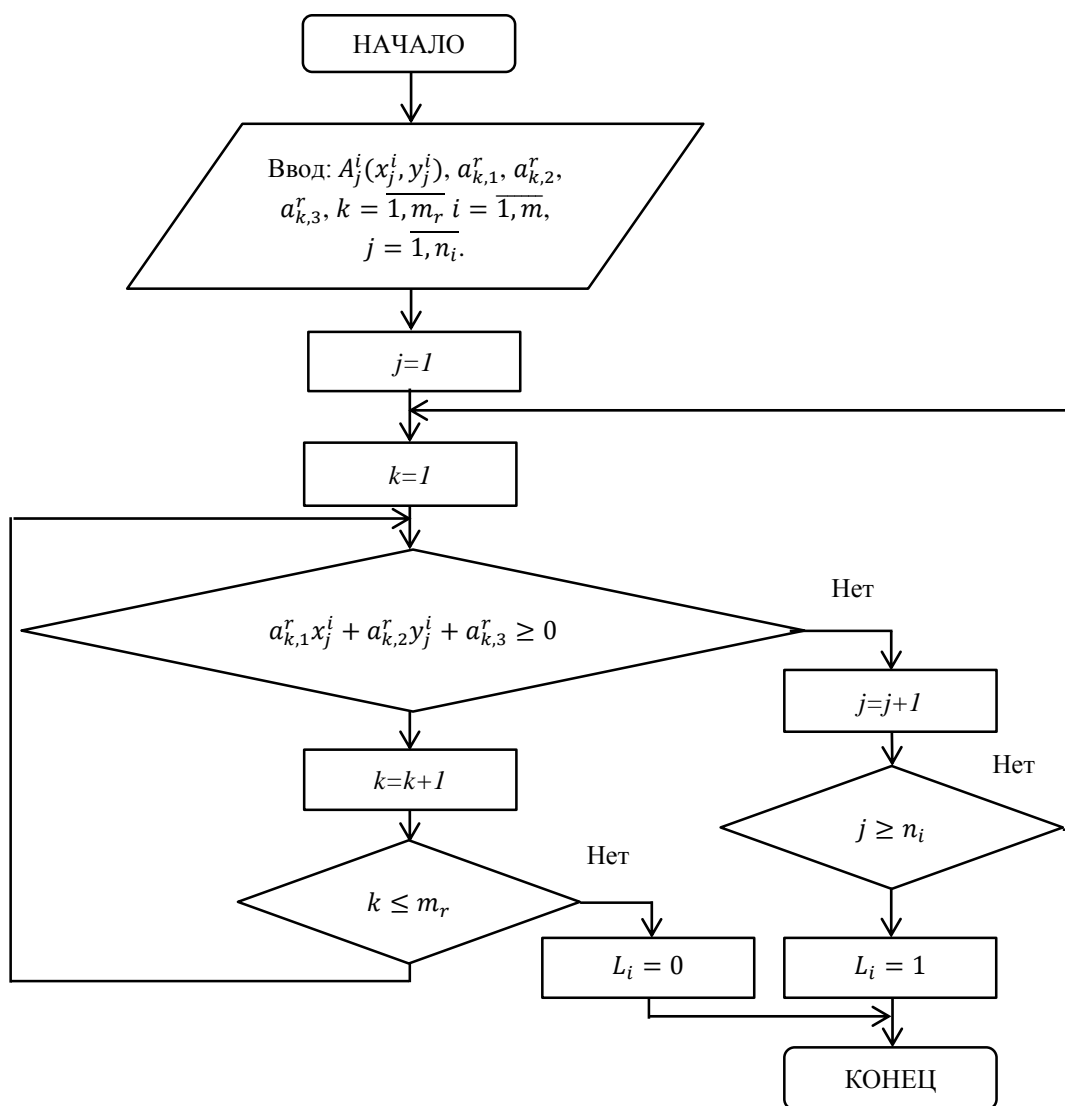


Рисунок 4.8 – Блок – схема процедуры ПРТО

Идея алгоритма решения задачи заключается в последовательной проверке логических условий (4.24) для каждой вершины многоугольника, аппроксимирующего ТВО. Если же все вершины многоугольника аппроксимирующего данное ТВО удовлетворяют логическому условию (4.24), то логический параметр $L_i = 0$, в противном случае $L_i = 1$.

В случае $L_i = 1$, не выполняется логическое условие (4.24), то

многоугольник аппроксимирующий i – тое ТВО пересекается с многоугольником аппроксимирующем ПР. Если же $L_i = 0$, то переходят к выполнению процедуры ТОПР.

Блок-схема процедуры ТОПР приведена на рисунке 4.9. Процедура ТОПР предназначена для определения принадлежности вершин многоугольника $A_k^r(x_k^r, y_k^r)$, аппроксимирующего ПР, многоугольнику аппроксимирующего i – тое ТВО, который задается полуплоскостями на основе значений коэффициентов $a_{j,1}^i, a_{j,2}^i, a_{j,3}^i, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n_i}$ логическое условие (4.25).

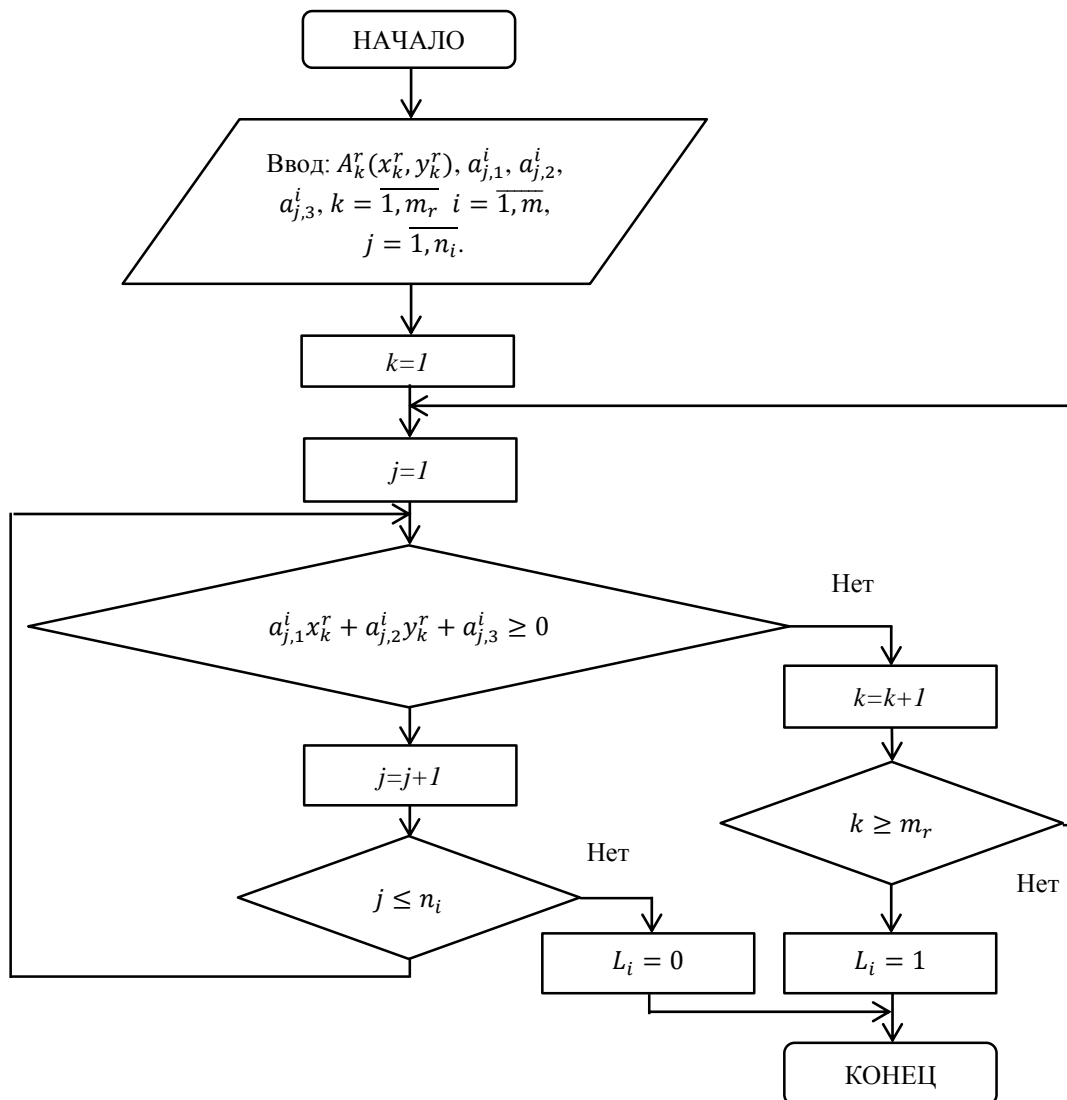


Рисунок 4.9 – Блок – схема процедуры ТОПР

Идея алгоритма решения задачи заключается в последовательной проверке логических условий (4.25) для каждой вершины многоугольника, аппроксимирующего ПР. Если же все вершины многоугольника аппроксимирующего ПР удовлетворяют логическому условию (4.25), то логический параметр $L_i = 0$, в противном случае $L_i = 1$.

Далее в случае $L_i = 1$, не выполняется логическое условие (4.25), то многоугольник аппроксимирующий ПР пересекается с многоугольником

аппроксимирующем i – тое ТВО. Если же $L_i = 0$, то данное ТВО не пересекается с ПР. Далее выбирается следующее ТВО и алгоритм повторяется. В случае рассмотрения всех ТВО выводятся значения параметров $L_i, i = \overline{1, m}$.

Возможен вырожденный случай расположения многоугольников (рисунок 4.10). Как видно из рисунка 4.10 в этом случае условие взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих i – тое ТВО и ПР (4.26) выполняется, однако при этом данные многоугольники пересекаются. Для того что бы избежать данное вырожденное расположение многоугольников, необходимо правильно без пересечений задать первоначальное расположение ТВО и ПР.

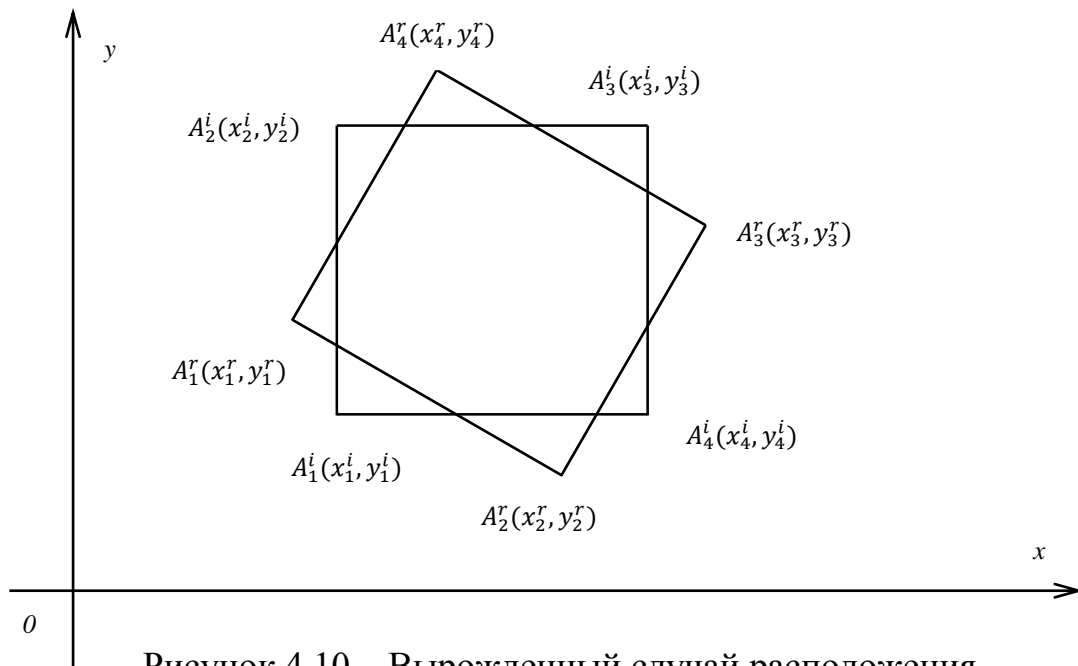


Рисунок 4.10 – Вырожденный случай расположения многоугольников аппроксимирующих i – тое ТВО и ПР

Для решения данной задачи необходимо определить направление и величину шага поиска оптимума целевой функции (4.21), при выполнении ограничений (4.3) и (4.20).

Направление поиска можно определить несколькими способами. Определим первоначально углы наклона φ_i прямой соединяющей среднюю точку многоугольника аппроксимирующего ПР и среднюю точку многоугольника аппроксимирующего i – тое ТВО. Для определения этого угла необходимо проанализировать возможные взаимные расположения многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО (рисунок 4.11).

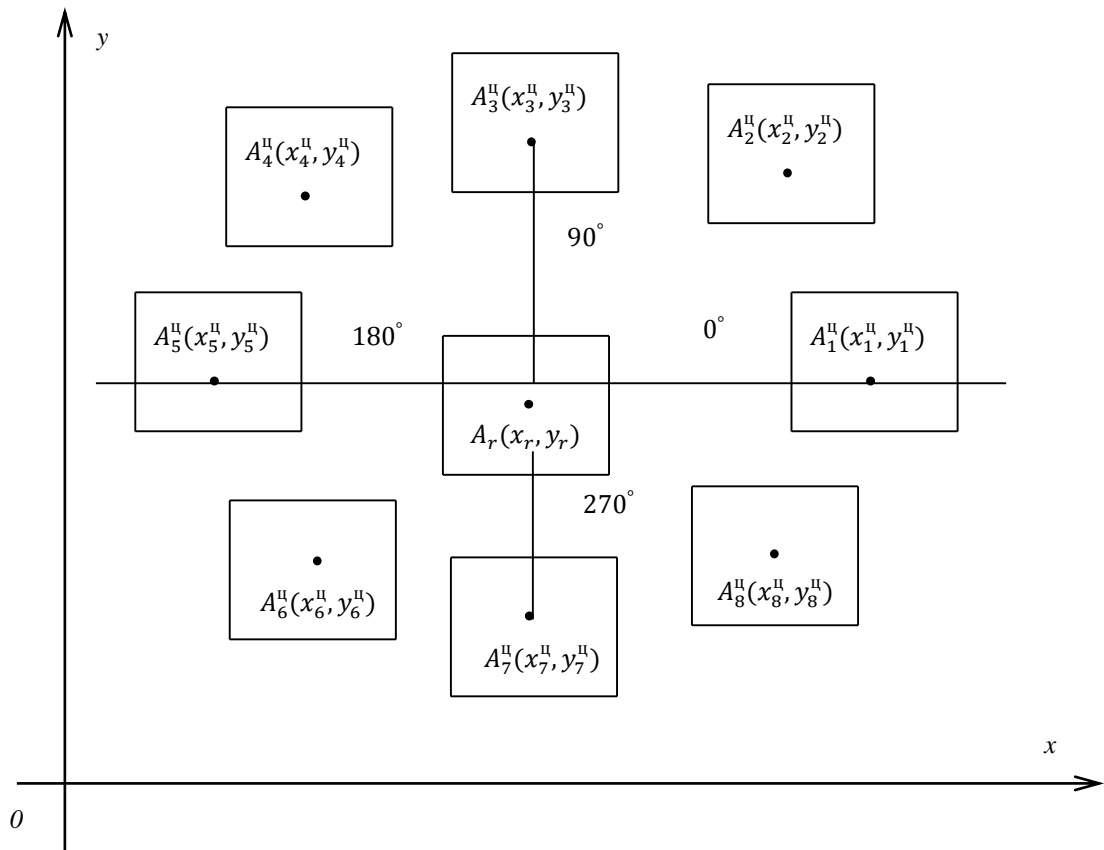


Рисунок 4.11 – Возможные взаимные расположения многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО

Как видно из рисунка 4.11 углы наклона φ_i зависят от соотношений координат средних точек $A_r(x_r, y_r)$ и $A_i^II(x_i^II, y_i^II)$. Как видно из рисунка 4.11 возможны 8 различных взаимных расположений средней точки многоугольника аппроксимирующего ПР и средних точек многоугольников аппроксимирующих ТВО.

Если значения координаты $x_r = x_i^II$, при этом значение координаты $y_r < y_i^II$, в этом случае расположение средней точки соответствует точке $A_3^II(x_3^II, y_3^II)$ (рисунок 4.11), в этом случае величина угла равна

$$\varphi_i = 90^\circ. \quad (4.27)$$

В случае значения координаты $x_r = x_i^II$, и значении координаты $y_r > y_i^II$, то расположение средней точки соответствует точке $A_7^II(x_7^II, y_7^II)$ (рисунок 4.11), тогда значение угла равно

$$\varphi_i = 270^\circ. \quad (4.28)$$

Если же значение координаты $y_r = y_i^II$, при значении координаты $x_r < x_i^II$, то расположение средней точки соответствует точке $A_1^II(x_1^II, y_1^II)$ (рисунок 4.11), тогда значение угла будет равно

$$\varphi_i = 0^\circ. \quad (4.29)$$

В случае значения координаты $y_r = y_i^II$ при условии, что значение координаты $x_r > x_i^II$, расположение данной средней точки соответствует точке $A_5^II(x_5^II, y_5^II)$ (рисунок 4.11), тогда значение угла равно

$$\varphi_i = 180^\circ. \quad (4.30)$$

Если значения координаты $x_r < x_i^H$, при этом значение координаты $y_r < y_i^H$, тогда расположение средней точки соответствует точке $A_2^H(x_2^H, y_2^H)$ (рисунок 4.11), в этом случае значение угла вычисляется по формуле

$$\varphi_i = \arctg \frac{y_2^H - y_r}{x_2^H - x_r}. \quad (4.31)$$

Если значения координаты $x_r < x_i^H$, а значение координаты $y_r > y_i^H$, тогда расположение средней точки соответствует точке $A_8^H(x_8^H, y_8^H)$ (рисунок 4.11), тогда значение угла можно вычислить следующим образом

$$\varphi_i = 270^\circ + \arctg \frac{y_r - y_8^H}{x_8^H - x_r}. \quad (4.32)$$

Если же значения координаты $x_r > x_i^H$, при значении координаты $y_r < y_i^H$, тогда расположение средней точки соответствует точке $A_4^H(x_4^H, y_4^H)$ (рисунок 4.11), в этом случае значение угла вычисляется следующим образом

$$\varphi_i = 90^\circ + \arctg \frac{y_4^H - y_r}{x_r - x_4^H}. \quad (4.33)$$

Если значения координаты $x_r > x_i^H$, при этом значение координаты $y_r > y_i^H$, тогда расположение средней точки соответствует точке $A_6^H(x_6^H, y_6^H)$ (рисунок 4.11), тогда значение угла вычисляется следующим образом

$$\varphi_i = 180^\circ + \arctg \frac{y_r - y_6^H}{x_r - x_6^H}. \quad (4.34)$$

Блок-схема процедуры ОУСТ определения угла наклона φ_i прямой соединяющей среднюю точку многоугольника аппроксимирующего ПР и среднюю точку многоугольника аппроксимирующего i – тое ТВО приведена на рисунке 4.12. Данная процедура подобна процедуре ОЦО (рисунок 3.3.), отличие процедур заключается в том, что в процедуре ОЦО рассматриваются центры окружностей, а в процедуре ОУСТ средние точки многоугольников. Для реализации этой процедуры вводятся $A_r(x_r, y_r)$ координаты средней точки многоугольника аппроксимирующего ПР и $A_i^H(x_i^H, y_i^H)$, $i = \overline{1, m}$ средние точки многоугольников аппроксимирующих ТВО. Далее производится анализ взаимного расположения средних точек (рисунок 4.11) и определяются при помощи выражений (4.27) – (4.34) величина угла наклона прямой соединяющей среднюю точку многоугольника аппроксимирующего ПР и среднюю точку многоугольника аппроксимирующего i – тое ТВО φ_i .

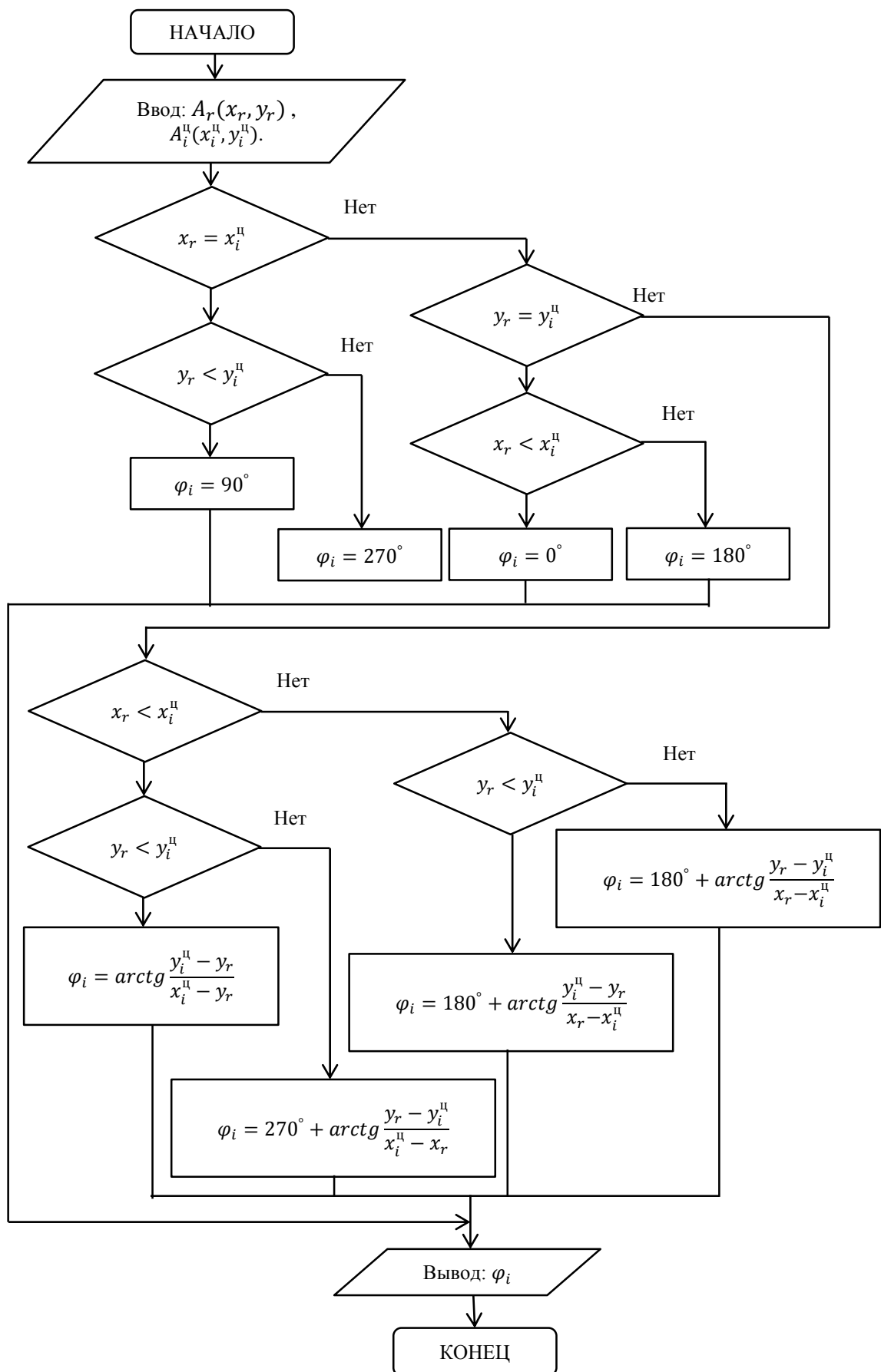


Рисунок 4.12 – Блок-схема процедуры ОУСТ

Величина угла φ_i наклона прямой соединяющей среднюю точку многоугольника аппроксимирующего ПР и средней точки многоугольника аппроксимирующего i – тое ТВО является выходным параметром данной процедуры ОУСТ. Если определены все углы наклона прямых соединяющих среднюю точку многоугольника аппроксимирующего ПР и средние точки многоугольника аппроксимирующего i – тое ТВО $\varphi_i, i = \overline{1, m}$, то можно определить направление поиска решения задачи (4.21), при выполнении ограничений (4.3) и (3.20).

Угол направления поиска решения данной задачи можно задать как среднее арифметическое всех углов $\varphi_i, i = \overline{1, m}$, тогда:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^m \varphi_i}{m}. \quad (4.35)$$

Для определения угла направления поиска решения, разработана процедура ОУПР, блок-схема которой показана на рисунке 4.13. Эта процедура подобна процедуре ОНПР (рисунок 3.4). Отличие заключается в использовании процедуры ОЦО и центров окружностей аппроксимирующих ПР и ТВО. Входными параметрами процедуры ОУПР являются $A_r(x_r, y_r)$ координаты средней точки многоугольника аппроксимирующего ПР и $A_i^H(x_i^H, y_i^H), i = \overline{1, m}$ средние точки многоугольников аппроксимирующих ТВО. Используя процедуру ОУСТ, на каждом шаге вычисляются значения $\varphi_i, i = \overline{1, m}$. Далее по вычисленным значениям φ_i по формуле (4.35) определяется φ , угол задающий направление поиска решения данной задачи. Значение угла φ является параметром вывода процедуры ОУПР.

Определим длины боковых отрезков многоугольника аппроксимирующего i – тое ТВО, соединяющих две соседние вершины, с учетом того что последняя вершина многоугольника соединена отрезком с первой вершиной. В этом случае добавляется еще одна вершина координаты, которой равны $x_{n_i+1}^i = x_1^i, y_{n_i+1}^i = y_1^i$. Тогда можно вычислить длины боковых отрезков всех многоугольников аппроксимирующих ТВО используя следующее выражение:

$$\forall(i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n_i + 1}): d_j^i = \sqrt{(x_j^i - x_{j+1}^i)^2 + (y_j^i - y_{j+1}^i)^2}. \quad (4.36)$$

Шаг Δ , поиска решения задачи построения КС РТК выберем меньше длины наименьшей длины бокового отрезка многоугольника (4.36):

$$d_{min} = \min(d_j^i), (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n_i + 1}). \quad (4.37)$$

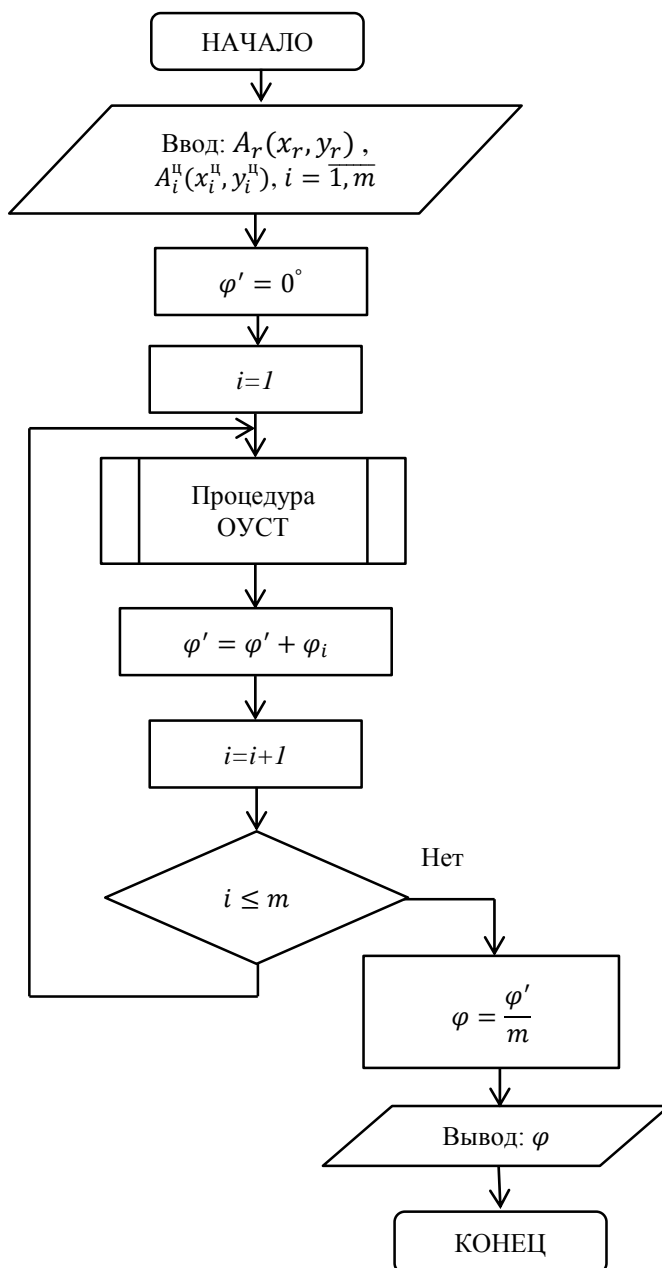


Рисунок 4.13 – Блок-схема процедуры ОУПР

Геометрическая интерпретация выбора величины шага Δ показана на рисунке 4.14.

На рисунке 4.14 *a* показано первоначальное расположение двух многоугольников и направление поиска параллельно минимальному боковому отрезку с шагом Δ , в случае если выполняется условие (4.36), то многоугольники всегда пересекутся. Только в случае если шаг поиска будет больше минимального бокового отрезка, случай показанный на рисунке 4.14 *б*, получим вырожденное расположение многоугольников. Следовательно, выбор шага с учетом логического условия (4.36) гарантирует исключение вырожденного случая (рисунок 4.10).

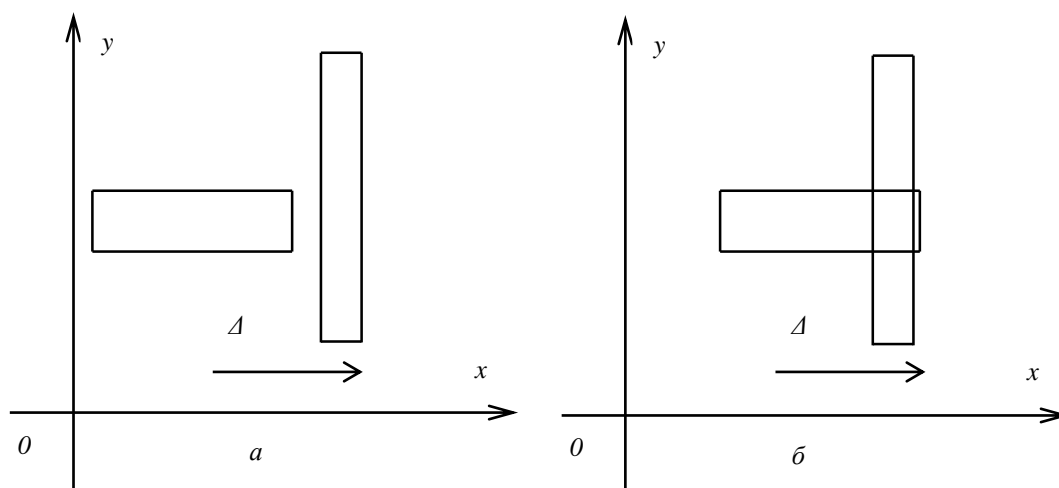


Рисунок 4.14 – Геометрическая интерпретация, выбора величины шага Δ по выражению (43)

Выбор величины шага Δ , поиска решения задачи построения КС РТК выберем из условия (4.37), с учетом заданной точности решения, который зададим множителем $0 < \delta < 1$, тогда

$$\Delta = \delta \times d_{min}, \quad (0 < \delta < 1). \quad (4.38)$$

Для реализации (4.36) (4.37) (4.38) разработана процедура ОВШП, блок-схема которой приведена на рисунке 4.15. Исходными данными являются $A_j^i(x_j^i, y_j^i)$, $j = \overline{1, n_i}$, $i = \overline{1, m}$ координаты вершин многоугольников аппроксимирующих ТВО, δ – множитель, задающий требуемую точность решения (4.38). С применением выражения (4.36), производится вычисление всех длин боковых отрезков многоугольников аппроксимирующих ТВО. Далее производится сравнение длин боковых отрезков многоугольников. Определив минимальное значение длины бокового отрезка d_{min} по формуле (4.38) определяем величину шага Δ , поиска решения данной задачи. В результате выполнения процедуры выводим значение шага поиска решения задачи Δ .

После определения направления и величины шага поиска решения задачи построения компоновочной схемы, необходимо определить новое положение ПР относительно ТВО (рисунок 4.16). Новое положение ПР соответствует точке конца вектора $\vec{\Delta}$. При этом изменятся значения координат средней точки и всех вершин многоугольника аппроксимирующего ПР.

При перемещении многоугольника аппроксимирующего ПР, из начальной точки в конечную точку вектора $\vec{\Delta}$, изменятся координаты средней точки $A_r(x_r, y_r)$ и координаты вершин многоугольника $A_k^r(x_k^r, y_k^r)$, $k = \overline{1, m_r}$.

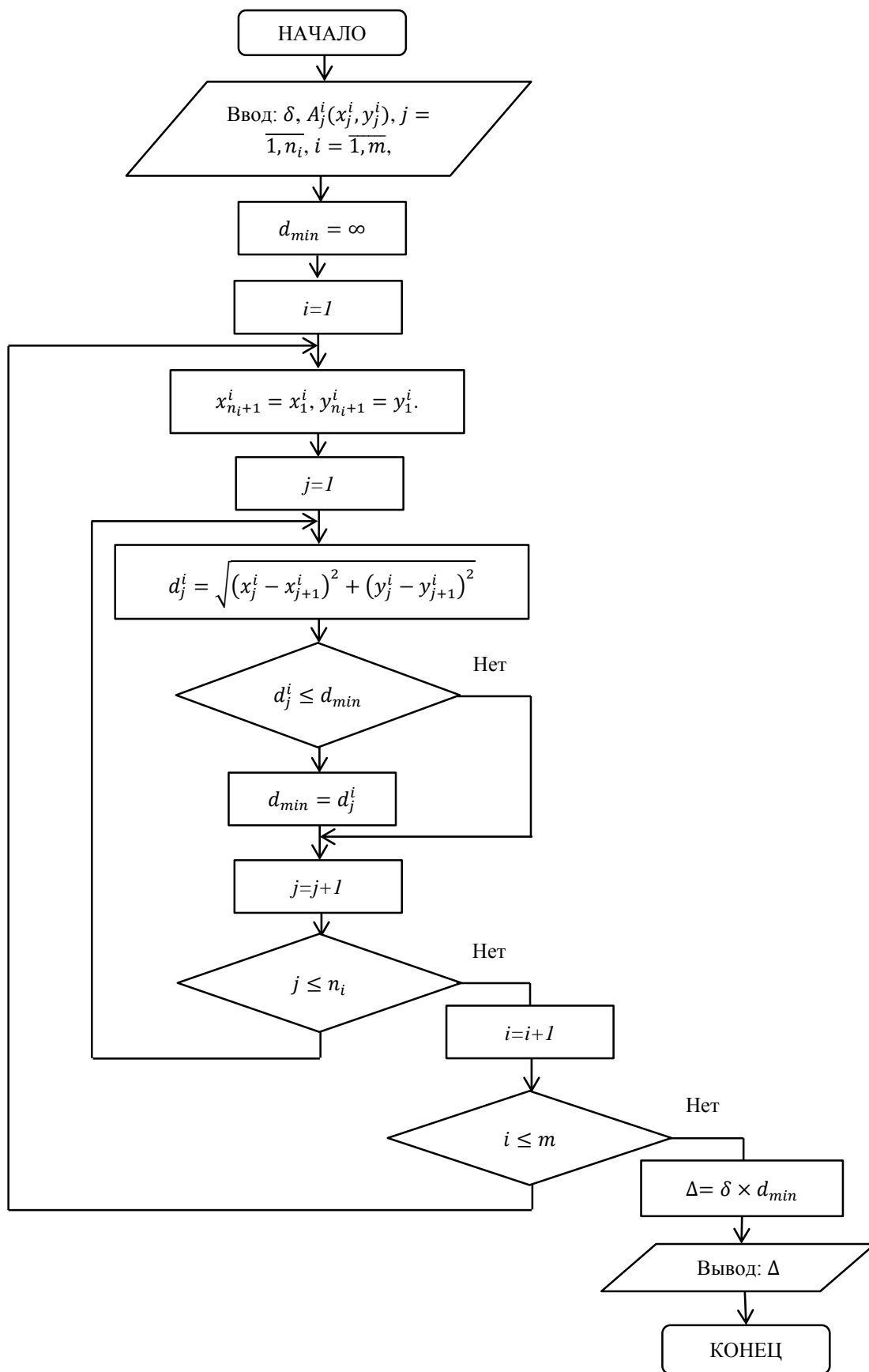


Рисунок 4.15 – Блок-схема процедуры ОВП

Новые координаты средней точки и вершин многоугольника аппроксимирующего ПР на основе исходных координат можно вычислить по

следующей формуле:

$$x_r^n = x_r + \Delta_x, y_r^n = y_r + \Delta_y, \quad (4.39)$$

$$\forall k = \overline{1, m_r}: x_k^{rn} = x_k^r + \Delta_x, y_k^{rn} = y_k^r + \Delta_y, \quad (4.40)$$

где Δ_x – проекция вектора $\vec{\Delta}$ на ось OX (рисунок 4.16),

Δ_y – проекция вектора $\vec{\Delta}$ на ось OY (рисунок 4.16).

В этом случае производится параллельный перенос средней точки и точек вершин многоугольника аппроксимирующего ПР по величине и направлению вектора $\vec{\Delta}$.

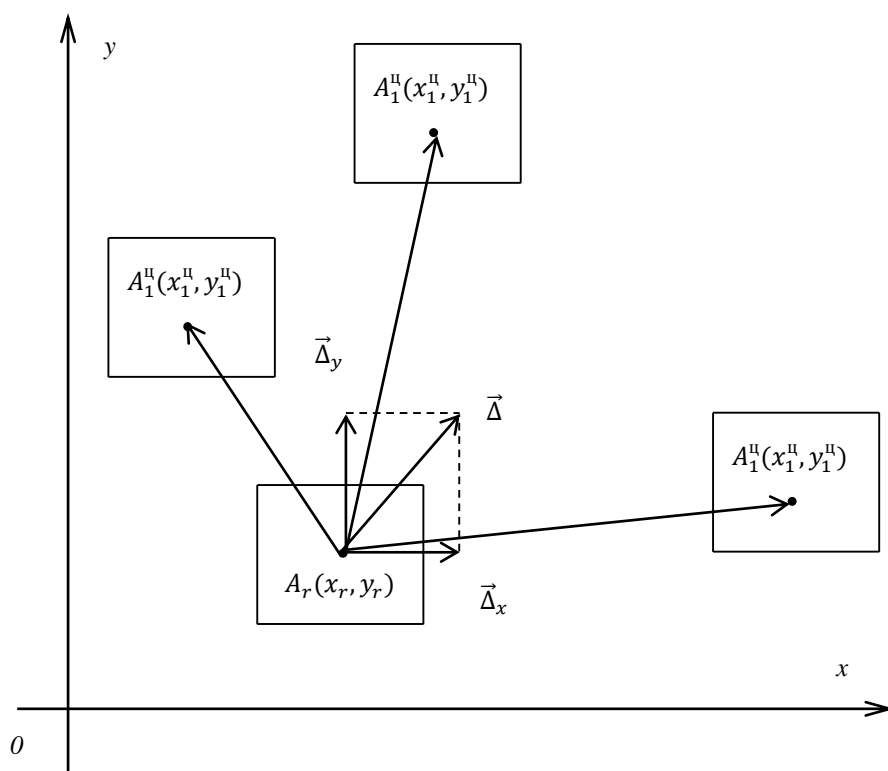


Рисунок 4.16 – Новое положение ПР относительно ТВО

Значения величин проекций векторов Δ_x и Δ_y зависят от значения шага и направление поиска решения задачи Δ и φ . Так величина Δ определена однозначно, то наибольшее влияние на взаимное расположение элементов РТК оказывает угол φ , возможные направления поиска показаны на рисунке 4.17. Как видно из рисунка 4.17, величина угла φ , которая определяется при помощи процедуры ОУПР, может соответствовать 8 положениям, в которых величины проекций векторов Δ_x и Δ_y будут различными.

Если величина угла $\varphi = 0^\circ$, то это соответствует направлению вектора $\vec{\Delta}$ (направление 1, рисунок 4.17), значения проекций векторов равны

$$\Delta_x = \Delta, \Delta_y = 0. \quad (4.41)$$

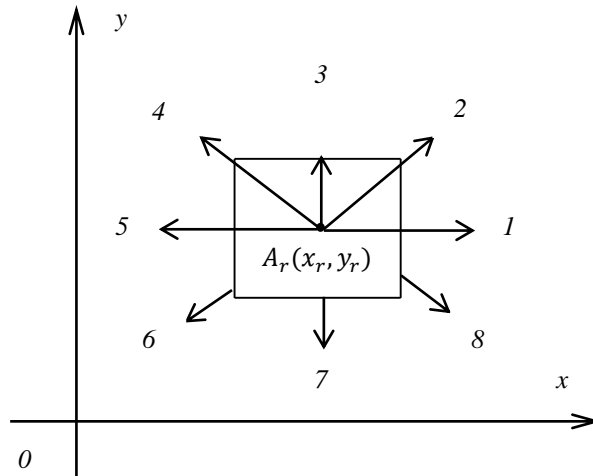


Рисунок 4.17 – Возможные направления поиска φ

Если величина угла находится в пределе $0^\circ < \varphi < 90^\circ$, то это соответствует направлению вектора $\vec{\Delta}$ (направление 2, рисунок 4.17), значения проекций векторов можно вычислить по следующему выражению

$$\Delta_x = \Delta \cos \varphi, \Delta_y = \Delta \sin \varphi. \quad (4.42)$$

Если величина угла $\varphi = 90^\circ$, то это соответствует направлению вектора $\vec{\Delta}$ (направление 3, рисунок 4.17), значения проекций векторов равны

$$\Delta_x = 0, \Delta_y = \Delta. \quad (4.43)$$

Если величина угла находится в пределе $90^\circ < \varphi < 180^\circ$, то это соответствует направлению вектора $\vec{\Delta}$ (направление 4, рисунок 4.17), значения проекций векторов можно вычислить по следующему выражению

$$\Delta_x = -\Delta \cos(180^\circ - \varphi), \Delta_y = \Delta \sin(180^\circ - \varphi). \quad (4.44)$$

Если величина угла $\varphi = 180^\circ$, то это соответствует направлению вектора $\vec{\Delta}$ (направление 5, рисунок 4.17), значения проекций векторов равны

$$\Delta_x = -\Delta, \Delta_y = 0. \quad (4.45)$$

Если величина угла находится в пределе $180^\circ < \varphi < 270^\circ$, то это соответствует направлению вектора $\vec{\Delta}$ (направление 6, рисунок 4.17), значения проекций векторов можно вычислить по следующему выражению

$$\Delta_x = -\Delta \cos(\varphi - 180^\circ), \Delta_y = -\Delta \sin(\varphi - 180^\circ). \quad (4.46)$$

Если величина угла $\varphi = 270^\circ$, то это соответствует направлению вектора $\vec{\Delta}$ (направление 7, рисунок 17), значения проекций векторов равны

$$\Delta_x = 0, \Delta_y = -\Delta. \quad (4.47)$$

Если величина угла находится в пределе $270^\circ < \varphi < 360^\circ$, то это соответствует направлению вектора $\vec{\Delta}$ (направление 8, рисунок 4.17), значения проекций векторов можно вычислить по следующему выражению

$$\Delta_x = \Delta \cos(360^\circ - \varphi), \Delta_y = -\Delta \sin(360^\circ - \varphi). \quad (4.48)$$

Для определения значений величин проекций векторов Δ_x и Δ_y используя выражения (4.41) – (4.48) разработана процедура ОПШП, блок-схема которой приведена на рисунке 4.18. Входными данными процедуры ОПШП являются величины угла φ и шага Δ . Далее в зависимости от

величины угла φ , согласно выражений (4.41) – (4.48), определяются значения проекций векторов Δ_x и Δ_y , которые являются выходными данными. В случае значения неверного задания значения угла φ выдается сообщение об ошибке.

На основе полученных значений проекций векторов Δ_x и Δ_y можно вычислить новые координаты средней точки $A_r(x_r, y_r)$ и координаты вершин многоугольника $A_k^r(x_k^r, y_k^r)$, $k = \overline{1, m_r}$ аппроксимирующего ПР (4.39), (4.40). Для реализации данных вычислений разработана процедура ОНСВ, блок – схема которой представлена на рисунке 4.19.

Процедура ОНСВ использует для своей реализации процедуры ОУПР, ОВШП, ОПШП. По этой причине входные данные должны обеспечить все перечисленные процедуры, а также расчет новых значений средней точки и координат вершин многоугольника аппроксимирующего ПР. Входными данными являются $A_j^i(x_j^i, y_j^i)$, $A_i^n(x_i^n, y_i^n)$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n_i}$ – координаты средних точек и вершин многоугольников аппроксимирующих ТВО, $A_k^r(x_k^r, y_k^r)$, $A_r(x_r, y_r)$, $k = \overline{1, m_r}$ – координаты средней точки и вершин многоугольника аппроксимирующего ПР, δ – требуемая точность решения задачи. Процедура ОУПР предназначена для расчета значения угла φ , задающего направление поиска решения задачи. Процедура ОВШП обеспечивает расчет значения шага поиска Δ . Процедура ОПШП обеспечивает расчет значений проекций векторов Δ_x и Δ_y . Далее определяется новые координаты средней точки $A_r(x_r, y_r)$ и вершин $A_k^r(x_k^r, y_k^r)$, $k = \overline{1, m_r}$ многоугольника аппроксимирующего ПР. Эти данные являются выходными данными процедуры ОНСВ.

При переходе к новому положению ПР относительно ТВО необходимо определить, охватывает ли РП все требуемые точки позиционирования (3.9). Это реализуется проверкой при помощи процедур РП – i . Так как описание РП ПР получено при условии расположения начала координат в точке $A_r(x_r, y_r)$.

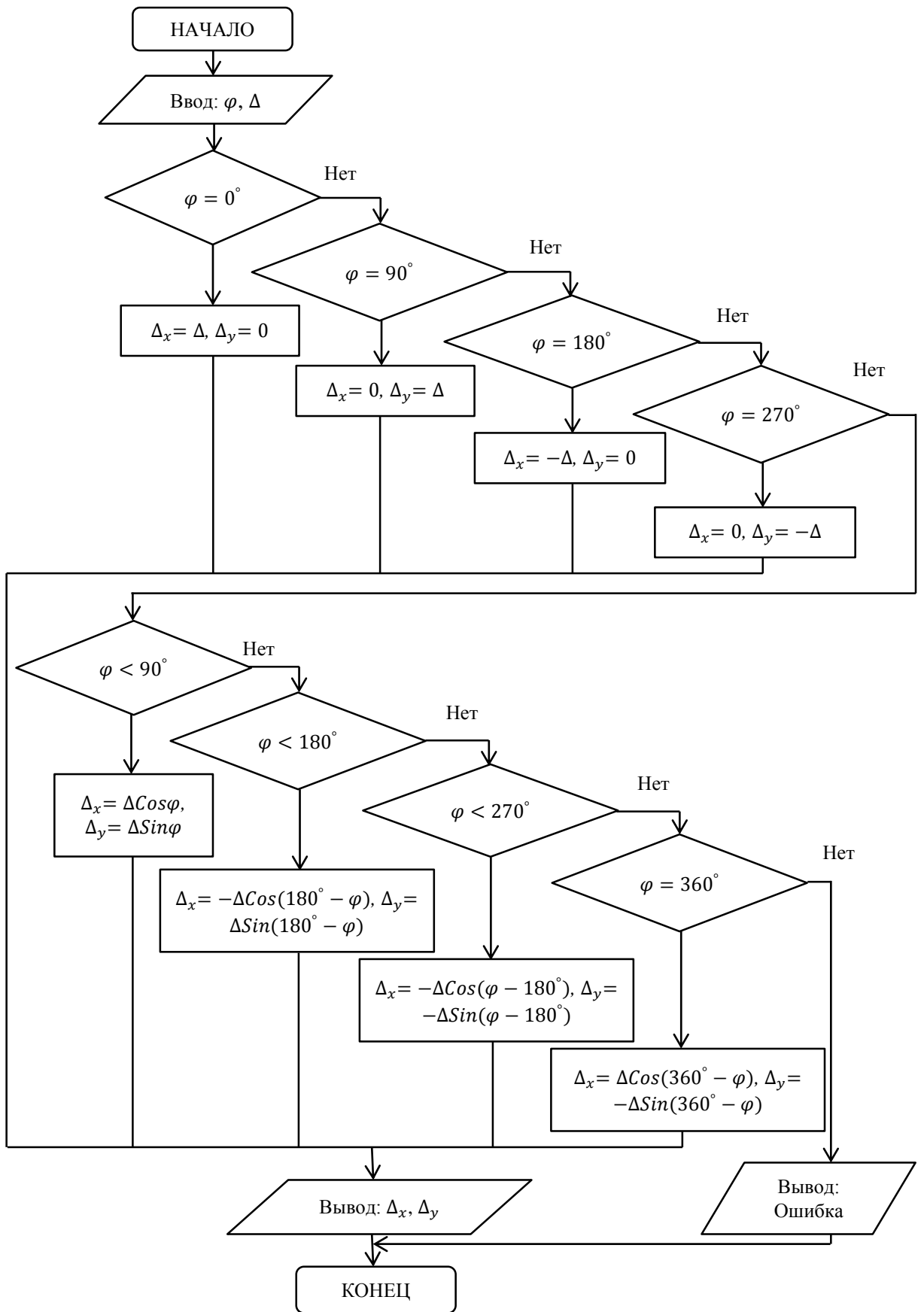


Рисунок 4.18 – Блок-схема процедуры ОПШП

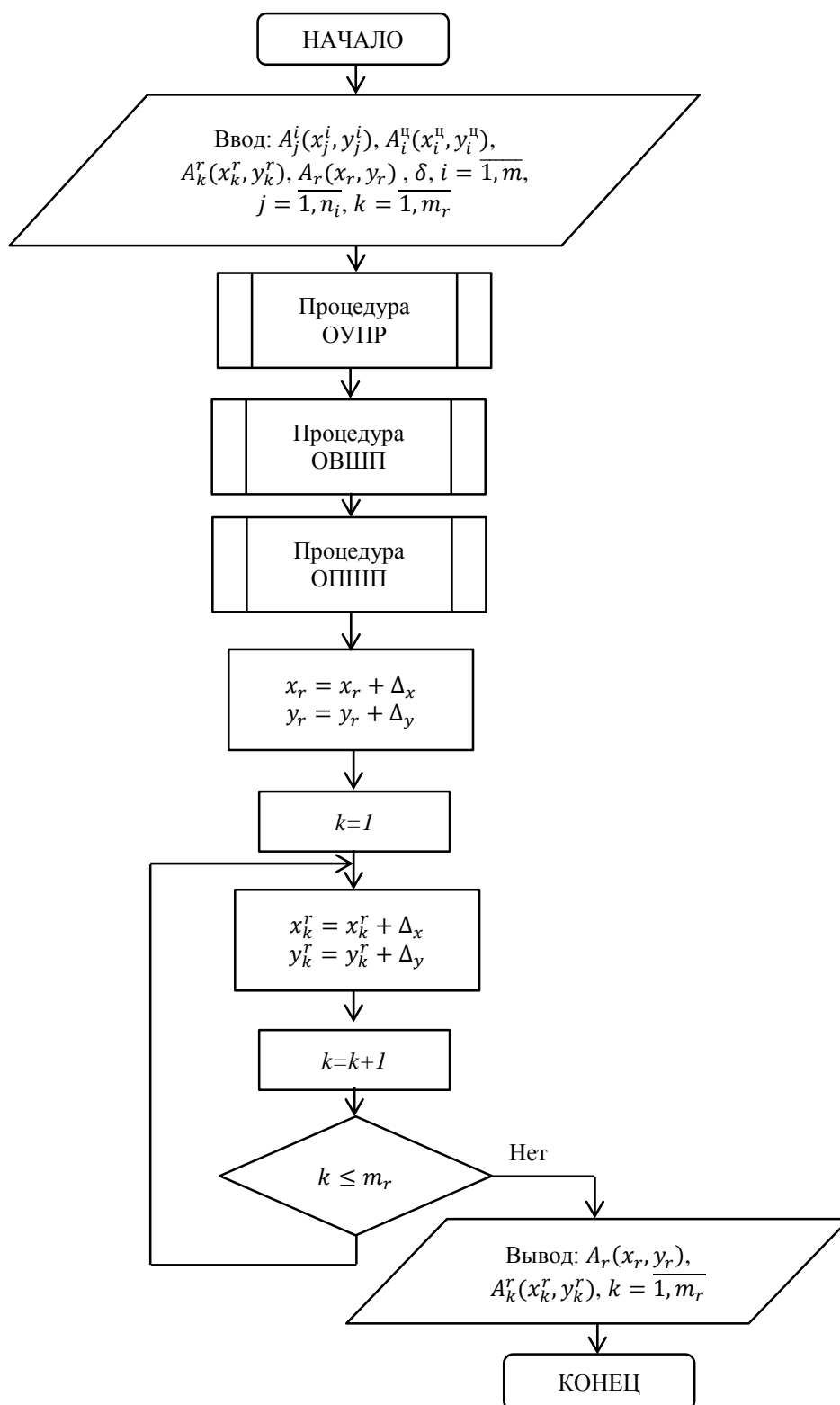


Рисунок 4.19 – Блок-схема процедуры ОНСВ

Для определения принадлежности требуемой точки позиционирования необходимо произвести переход от начальной системы координат, к системе координат связанной с центром многоугольника аппроксимирующего ПР. Данный переход задается выражением (3.15).

Для реализации выражения (3.15) разработана процедура СКЦМР, подобная процедуре СКТПР (рисунок 3.3), которая производит переход в

новую систему координат, требуемых точек позиционирования схвата ПР $B_k^i(x_k^i, y_k^i, z_k^i)$, где $k = \overline{1, p_i}$, $i = \overline{1, m}$. Блок – схема процедуры СКЦМР представлена на рисунке 4.20.

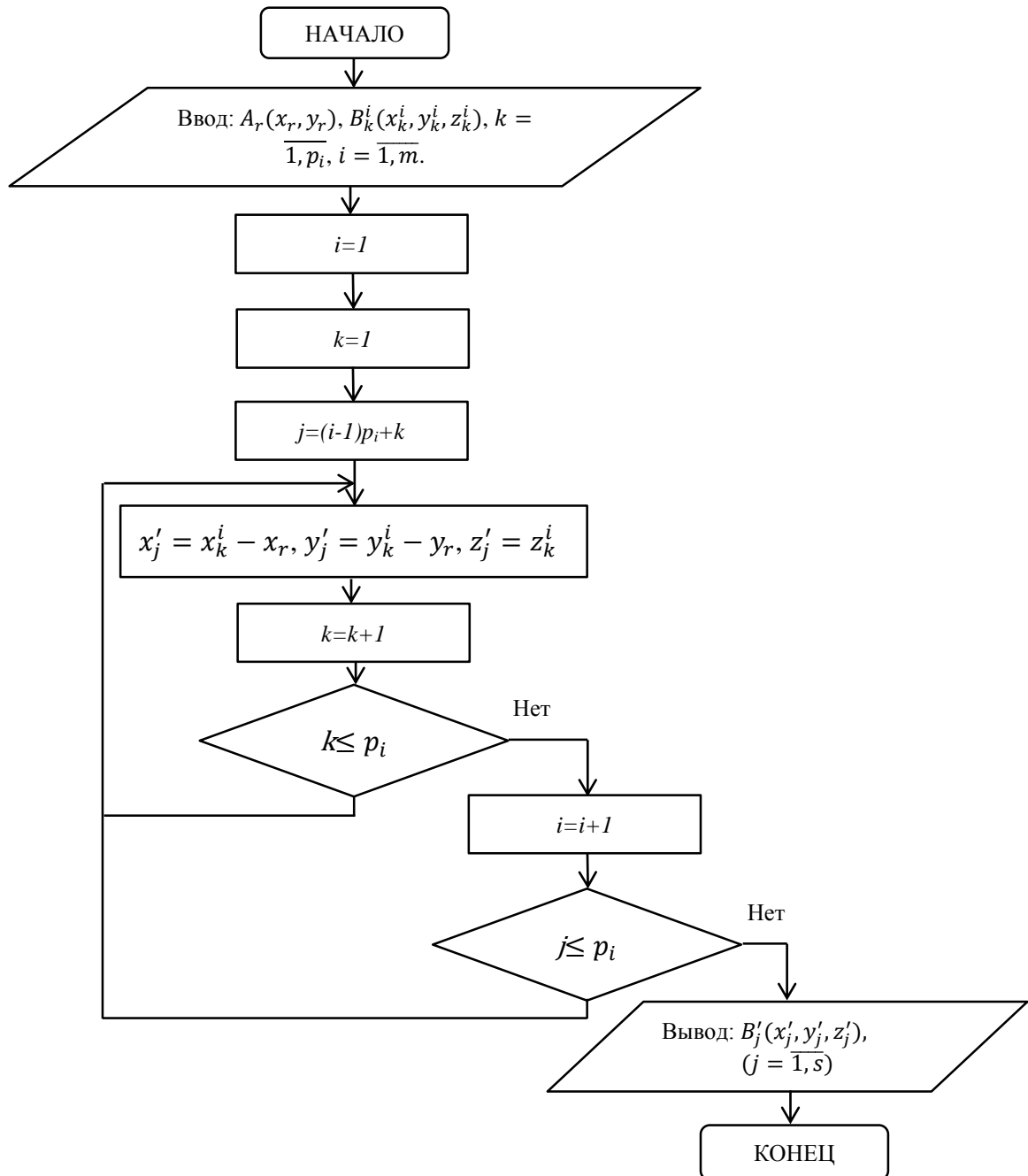


Рисунок 4.20 – Блок-схема процедуры СКЦМР

Входными данными процедуры СКЦМР будут координаты центра многоугольника аппроксимирующего ПР $A_r(x_r, y_r)$ и координаты требуемых точек позиционирования $B_k^i(x_k^i, y_k^i, z_k^i)$, где $k = \overline{1, p_i}$, $i = \overline{1, m}$. Далее в цикле по формуле (3.15) определяются новые координаты требуемых точек позиционирования $B'_j(x'_j, y'_j, z'_j)$, $j = \overline{1, s}$, которые и являются выходными данными данной процедуры.

Для определения охвата РП ПР всех требуемых точек позиционирования

схвата ПР необходимо определить наиболее удаленную точку $A_d(x_d, y_d, z_d)$ (2.138). Подобная процедура имела место и при выборе ПР по РП, процедура ВМТП.

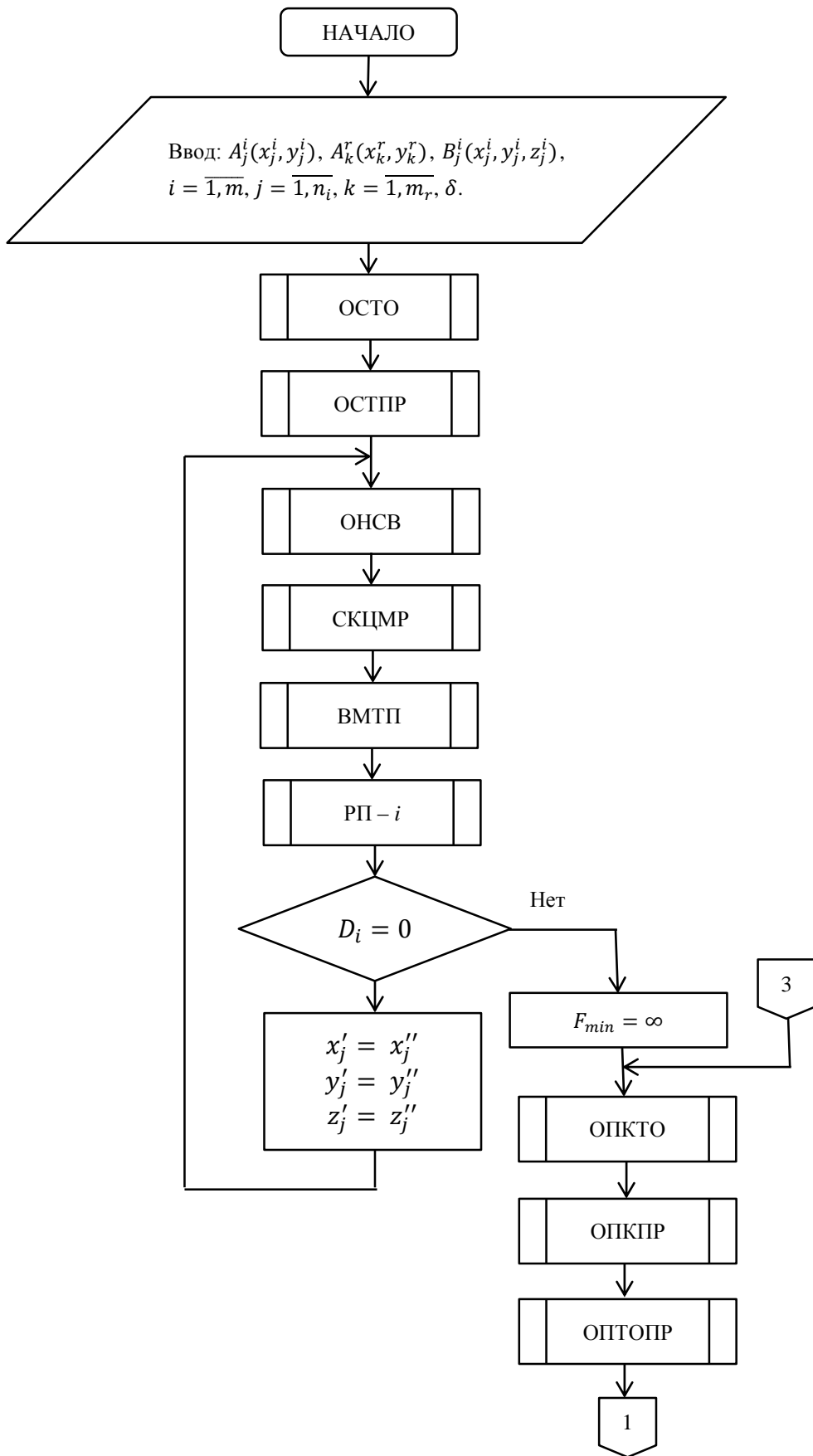
Используя процедуру ВМТП (рисунок 2.26) определим точку $A_d(x_d, y_d, z_d)$. Далее используя процедуры описания РП ПР необходимо обеспечить охват самой удаленной точки $A_d(x_d, y_d, z_d)$. Если самая удаленная точка принадлежит РП ПР, то проверяется условие охвата всех требуемых точек позиционирования $B'_j(x'_j, y'_j, z'_j), j = \overline{1, s}$.

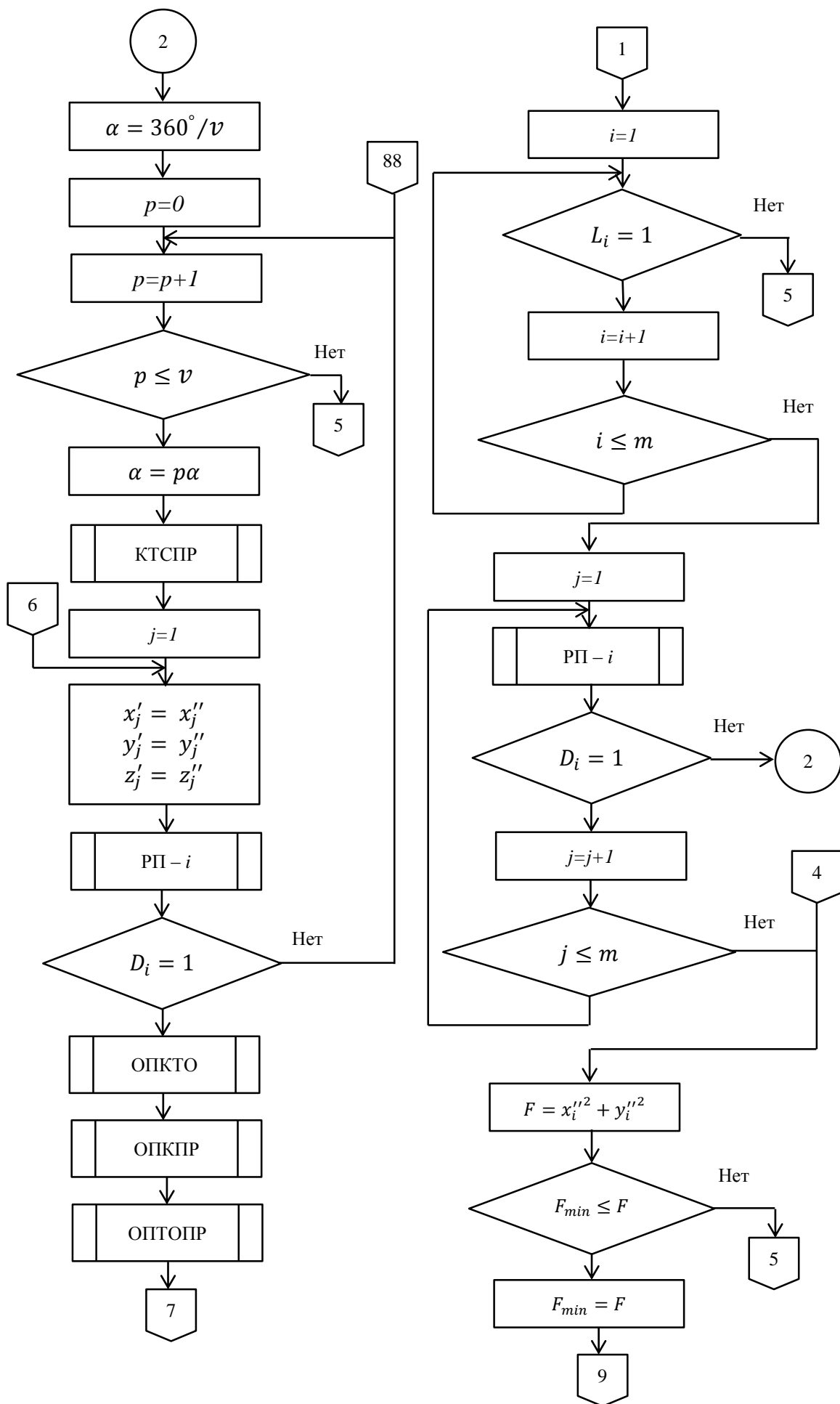
Для реализации алгоритма построения компоновочной схемы при аппроксимации элементов РТК прямоугольными призмами разработан алгоритм, блок – схема которого представлена на рисунке 4.21.

Входными данными алгоритма будут координаты вершин многоугольника, аппроксимирующего ТВО $A_j^i(x_j^i, y_j^i)$, где $i = \overline{1, m}$, – порядковый номер многоугольника, аппроксимирующего ТВО, m – количество единиц ТВО, $j = \overline{1, n_i}$ – порядковый номер вершины i -того многоугольника, n_i – количество вершин i -того многоугольника, координаты требуемых точки позиционирования $B_k^i(x_k^i, y_k^i, z_k^i)$, где $k = \overline{1, p_i}$ – порядковый номер точки позиционирования, p_i – количество точек позиционирования, привязанных к i -тому многоугольнику, координаты вершин многоугольника, аппроксимирующего ПР $A_l^r(x_l^r, y_l^r)$, где $l = \overline{1, m_r}$ – порядковый номер вершины, m_r – количество вершин многоугольника, аппроксимирующего ПР, множитель, задающий требуемую точность решения задачи δ .

Далее при помощи процедуры ОСТО определим координаты средних точек многоугольников аппроксимирующих ТВО $A_i(x_i^H, y_i^H)$ средней точки, соответствующего многоугольника $i = \overline{1, m}$. Таким же образом с применением процедуры ОСТПР определим координаты средней точки многоугольника аппроксимирующего ПР $A_r(x_r, y_r)$.

На основе процедуры ОНСВ выполняется перемещение ПР в направлении расположения ТВО и определяются новые координаты средней точки $A_r(x_r, y_r)$ и координаты вершин многоугольника $A_k^r(x_k^r, y_k^r), k = \overline{1, m_r}$ аппроксимирующего ПР. С применением процедуры СКЦМР, осуществляется переход в новую систему координат, связанную со средней точкой многоугольника аппроксимирующего ПР, требуемых точек позиционирования схвата ПР $B_k^i(x_k^i, y_k^i, z_k^i)$, где $k = \overline{1, p_i}, i = \overline{1, m}$. Далее при помощи процедуры ВМТП, определяются координаты наиболее удаленной точки позиционирования схвата ПР $A_d(x_d, y_d, z_d)$. С применением процедуры РП – i проверяется условие принадлежности данной точки $A_d(x_d, y_d, z_d)$ РП ПР.





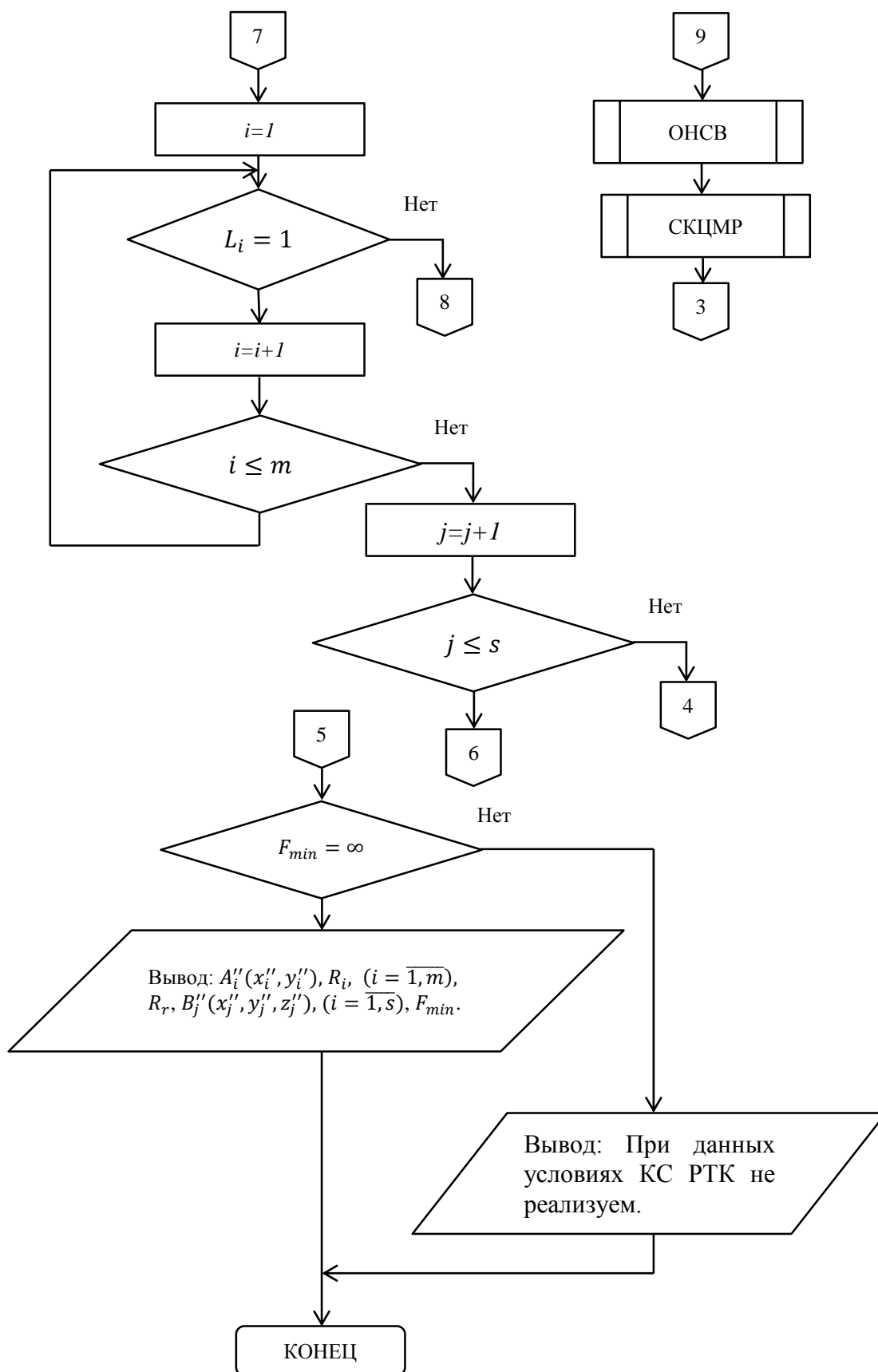


Рисунок 4.21 – Блок-схема алгоритма построения компоновочной схемы при аппроксимации элементов РТК прямоугольными призмами

В случае не выполнения данного условия осуществляется переход к процедуре ОНСВ и осуществляется перемещение ПР в сторону ТВО.

В случае выполнения условия принадлежности удаленной точки $A_d(x_d, y_d, z_d)$ РП ПР, значению функционала, минимизации расстояний между средними точками многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО достаточно большое значение. Далее выполняется процедура ОПКТО определения коэффициентов описывающих полуплоскости, задающих боковые отрезки многоугольника аппроксимирующего i – тое оборудование. При помощи процедуры ОПКПР, определяются коэффициенты полуплоскостей, задающих боковые отрезки многоугольника аппроксимирующего ПР. С применением процедуры ОПТОПР определяется условие взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих ТВО с многоугольником аппроксимирующим ПР. Далее проверяются логические переменные задающие взаимного не пересечения многоугольника аппроксимирующего ПР и i – тое оборудование. В случае пересечения многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО, делается вывод о невозможности построения КС РТК, при данных условиях и осуществляется переход на конец алгоритма.

В случае не пересечения многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО, выполняется процедура РП – i и проверяется условие принадлежности требуемых точек позиционирования схвата ПР РП. Если не выполняется условие охвата требуемых точек позиционирования, то осуществляется переход к процессу поиска такого взаимного расположения РП ПР и требуемых точек позиционирования, путем поворота ПР вокруг средней точки. Этот процесс выполняется с заданным периодом дискретизации. Так как ПР вокруг средней точки, то изменяются координаты требуемых точек позиционирования. Это выполняется при помощи процедуры КТСПР. Далее проверяется условие охвата РП ПР полученных новых требуемых точек позиционирования схвата ПР.

Если выполняется условие охвата РП ПР всех требуемых точек позиционирования схвата, необходимо проверить условие взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО. Это связано с тем, что при выполнении поворота ПР вокруг средней точки изменяются координаты вершин многоугольника аппроксимирующего ПР. Поэтому при помощи процедуры ОПКТО определяются коэффициенты полуплоскостей, задающих боковые отрезки многоугольников аппроксимирующих каждое i – тое оборудование. А при помощи процедуры ОПКПР, определяются коэффициенты полуплоскостей, задающих боковые отрезки многоугольника аппроксимирующего ПР. Теперь с применением процедуры ОПТОПР можно определить взаимное не пересечение многоугольников аппроксимирующих ТВО и ПР. Далее проверяется условие взаимного не пересечения многоугольника аппроксимирующего ПР и i – тое оборудование. В случае пересечения многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО, осуществляется переход к циклу, при помощи которого осуществляется

дальнейший поворот ПР вокруг средней точки. И цикл повторяется. При выполнении полного поворота ПР вокруг средней точки и не выполнения условий охвата РП ПР всех требуемых точек позиционирования или взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО делается вывод о невозможности построения КС РТК, при данных условиях и осуществляется переход на конец алгоритма.

В случае если выполняется условие охвата РП ПР всех требуемых точек позиционирования и взаимного не пересечения многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО вычисляется значение функционала, равного сумме расстояний между средними точками многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО. Данное значение сравнивается с предыдущим значением функционала и новому значению функционала присваивается минимальное значение. Далее осуществляется переход к выполнению процедуры ОНСВ, при помощи которой определяются новые координаты средней точки $A_r(x_r, y_r)$ и координаты вершин многоугольника $A_k^r(x_k^r, y_k^r)$, $k = \overline{1, m_r}$ аппроксимирующего ПР. На основе процедуры СКЦМР, выполняется переход в новую систему координат, связанную со средней точкой многоугольника аппроксимирующего ПР, требуемых точек позиционирования схвата ПР $B_k^i(x_k^i, y_k^i, z_k^i)$, где $k = \overline{1, p_i}$, $i = \overline{1, m}$. Далее цикл повторяется с самого начала.

Недостатком разработанного алгоритма является отсутствие алгоритма обхода препятствий, не полный учет всех возможных взаимных расположений РП ПР, относительно требуемых точек позиционирования схвата. Однако, его результаты применимы на предварительных стадиях разработки КС РТК. На основании результатов работы алгоритма можно оценить возможность применения рассматриваемой модели ПР для роботизации заданного ТП.

4.4 Разработка компоновочных схем РТК производства товарного свинца, цинка и магния при аппроксимации её элементов прямоугольными призмами

На основе разработанной блок-схемы алгоритма (рисунок 4.21) разработан пакет прикладных программ (ППП) построения КС РТК в программной среде Delphi 7 [128]. Листинг основного модуля программы приведен в приложении 3. Вследствие большого объема, не приведены файл проекта, модуль служебных утилит, модуль настроек.

Основное окно программы построения КС РТК показано на рисунке 3.13. При выборе пункта меню «Редактировать данные робота» появляется следующая форма, для типа аппроксимации многоугольник (рисунок 4.22).

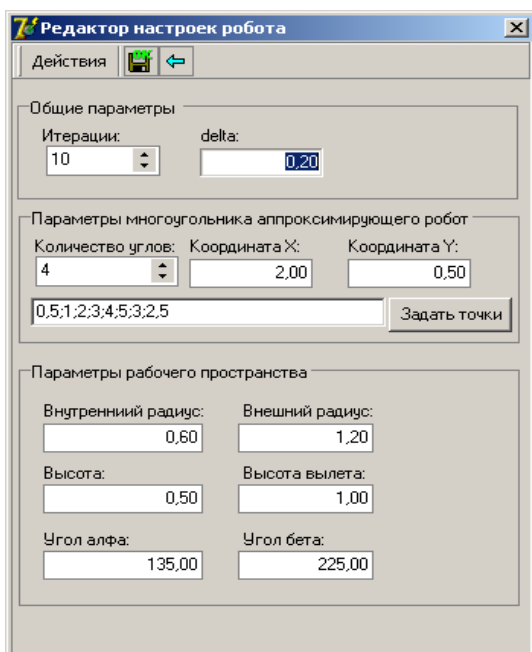


Рисунок 4.22 – Аппроксимация элементов РТК многоугольниками

В данной форме доступны следующие группы параметров:

- общие параметры. В данной группе редактируется количество итераций и параметр дельта. Количество итераций можно задать или напрямую или с помощью кнопок, увеличивая или уменьшая с шагом один. Дельта вводится напрямую вводом соответствующего числа.

- параметры многоугольника аппроксимирующего робот. В этой группе задаются параметры многоугольника, аппроксимирующего робот. К этим параметрам относятся количество углов, две координаты по направлению x и по направлению y и координаты точек углов многоугольника. Все параметры вводятся напрямую в соответствующие поля за исключением координат точек углов многоугольника.

Координаты точек углов многоугольника задаются с помощью кнопки «Задать точки». При вызове этой команды появляется следующая форма, на которой в виде списка отображаются координаты узлов (рисунок 4.23).

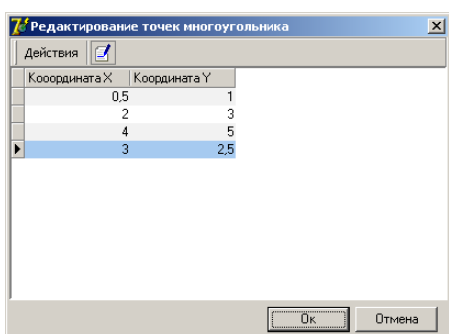



Рисунок 4.23 – Меню определения координат точек многоугольника

Количество строк в этой таблице будет всегда равно количеству углов заданному на предыдущей форме. Для задания координат углов необходимо выбрать в таблице нужную строчку и нажать на кнопку «Изменить» . При этом появится следующая форма, где задаются координаты x, y (рисунок

4.24). После чего нажать кнопку «Ок».

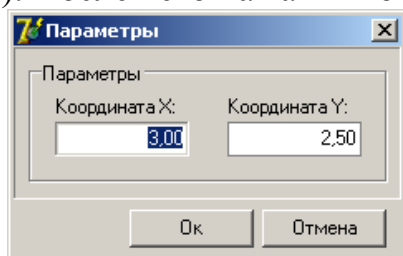


Рисунок 4.24 – Меню изменения параметров многоугольника

При задании всех координат необходимо нажать кнопку «Ок», при этом будет производиться проверка, заданы ли координаты для всех углов (рисунок 4.25). Если нет, то будет выдано предупреждающее сообщение.

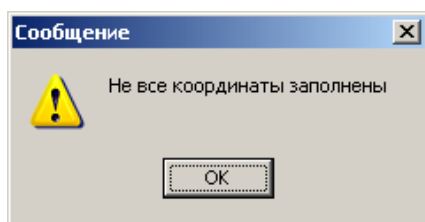


Рисунок 4.25 – Меню подтверждения не полного задания параметров многоугольника

Если все координаты заполнены, то список координат для всех углов отображается в соответствующем поле через точку с запятой.

- параметры рабочего пространства робота. В этой группе задаются параметры, характеризующие рабочее пространство робота. Это внутренний и внешний радиус, высота и высота вылета, и углы охвата альфа и бета. Все параметры вводятся напрямую в соответствующие поля.

Для сохранения результатов необходимо нажать на кнопку «Сохранить». При этом заданные параметры будут сохранены в файл, а также загружены в память программы. Для выхода без сохранения параметров необходимо нажать кнопку «Выход».

При выборе пункта меню «Редактировать данные» при условии, что выбран тип аппроксимации многоугольник появится следующая форма (рисунок 4.26).

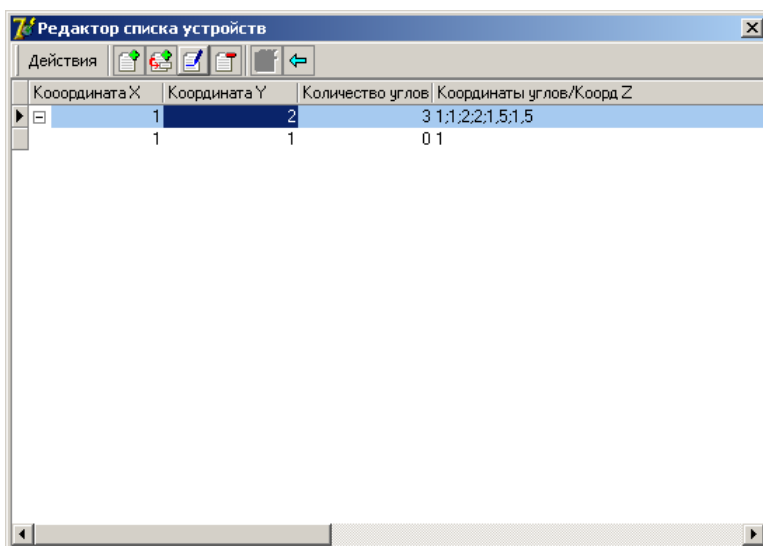



Рисунок 4.26 – Меню «Редактировать данные» параметров многоугольника

В этой форме редактируется список устройств и точек привязки, которые отображаются в виде двухуровневого дерева, где на первом уровне находятся устройства, а на втором уровне точки привязки.

Для добавления нового устройства необходимо нажать кнопку «Добавить» . При этом появляется следующая форма (рисунок 4.27).

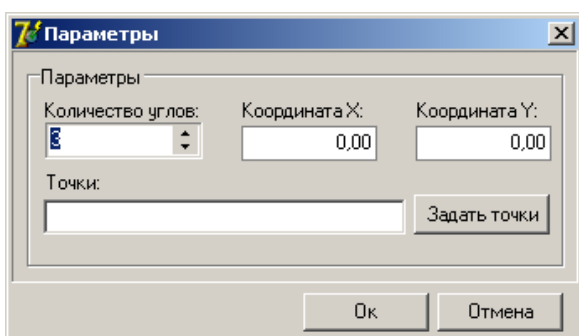




Рисунок 4.27 – Меню добавления элементов РТК

На этой форме задаются значения координат x и y, количество точек и координаты каждой точки. Координаты для каждой точки задаются также как было описано выше

Для сохранения введенных данных необходимо нажать кнопку **Ок**. Если данные нет необходимости сохранять, то нажимается кнопка «Отмена».

Для редактирования ранее введенного устройства необходимо выбрать в таблице необходимое устройство и нажать кнопку «Изменить» . При редактировании отображается та же форма что и при добавлении, только с уже введенными данными устройства.

Для добавления точек привязки необходимо нажать кнопку «Добавить точку привязки» . В результате чего появляется следующая форма (рисунок 4.28)

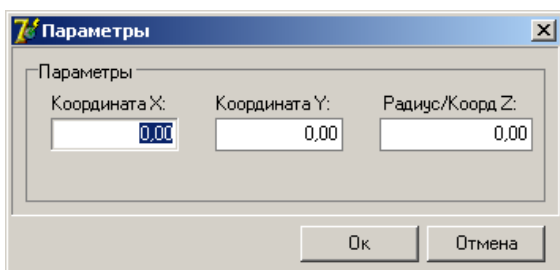




Рисунок 4.28 – Меню добавления точек привязки многоугольников

На этой форме задается координаты x , y , z точки привязки.

Если при добавлении точки привязки было выделено устройство, то точка позиционирования добавляется как подчиненная к этому устройству. Если же была выделена точка привязки, то новая точка привязки добавляется на том же уровне и подчиненном тому же устройству.

Для редактирования ранее введенной точки привязки необходимо выбрать в таблице необходимую точку привязки и нажать кнопку «Изменить» . При редактировании отображается та же форма что и при добавлении, только с уже введенными данными.

Для удаления точки привязки необходимо выбрать в таблице нужную точку привязки и нажать кнопку «Удалить» . При этом будет запрошено подтверждение удаления (рисунок 4.29).

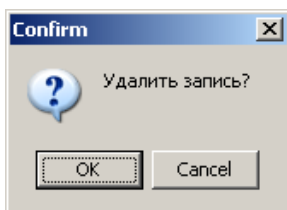



Рисунок 4.29 – Запрос на удаление точки привязки многоугольника

Для подтверждения удаления необходимо нажать «ОК», для отмены необходимо нажать на кнопку «Cancel».

Для удаления устройства необходимо выбрать в таблице нужное устройство и нажать кнопку «Удалить» . При этом также будет запрошено подтверждение удаления. При удалении устройства выполняется проверка, есть ли у устройства введенные точки привязки. Если точек привязки нет, то устройство будет удалено, в противном случае будет выведено следующее сообщение (рисунок 4.30).

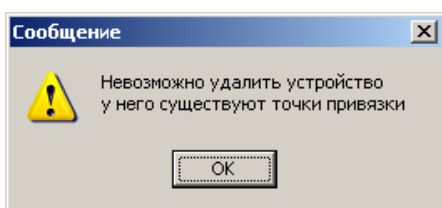



Рисунок 4.30 – Подтверждения наличия точки привязки многоугольника

Выход из режима редактирования устройств выполняется при нажатии

на кнопку «Заккрыть» . При этом проверяется, был ли список устройств или точек привязки изменен. В случае если изменений не было, то форма редактирования списка устройств закрывается. В противном случае выводится сообщение (рисунок 4.31).

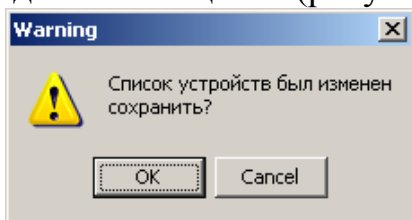




Рисунок 4.31 – Подтверждение об изменении координат точек привязки многоугольника

Если будет нажата кнопка «OK», то список устройств и точек привязки будет сохранен в файл. Если будет нажата кнопка «Cancel», то все изменения будут потеряны.

Также имеется возможность одновременного сохранения данных и выхода из режима редактирования списка устройств. Для этого необходимо нажать кнопку «Сохранить и выйти» . При выборе этой команды данные будут сохранены в файл и форма закроется. Данная кнопка по умолчанию неактивна и становится доступной для выполнения, только если данные были изменены.

Для расчета, для типа аппроксимации многоугольник, по приведенному выше алгоритму для многоугольника, необходимо нажать кнопку «Расчет» . При выборе этой команды из файла будут загружены введенные данные и выполнен расчет по алгоритму описанному выше. Результаты расчета отображаются в текстовом виде (рисунок 4.32).

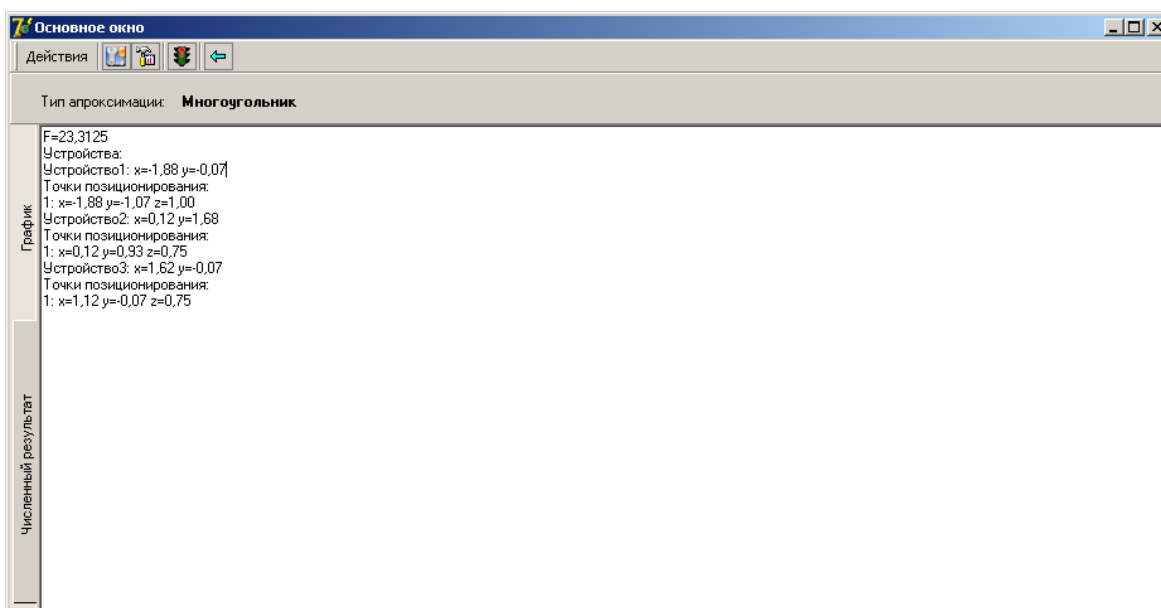


Рисунок 4.32 – Результаты расчета

С применением данной программы рассмотрим задачу построения КС

РТЯ снятия оксидной пленки с поверхности расплавов свинца и цинка залитых в неподвижные изложницы КРМ. Для этого аппроксимируем КРМ (рисунок 1.1) и его элементы многоугольниками (рисунок 4.34).

На рисунке 4.34 показана КС РТК снятия оксидной пленки с поверхности расплавов свинца и цинка залитых в неподвижные изложницы КРМ. На этом рисунке ПР 4 при помощи скребков снимает оксидную пленку с поверхности расплава, залитого в изложницы 5. В изложницы 5 расплав заливается при помощи устройства 2. Готовые застывшие чушки, вынимаются из изложниц при помощи устройства 3.

Применение аппроксимации элементов КРМ и ПР прямоугольными призмами в данном случае будет выполнено приближенно, что не всегда допустимо.

Рассмотрим процедуру построения КС РТК производства товарного магния. В этом случае задача решается в два этапа. На первом этапе разрабатывается КС РТЯ переброса струи металлического расплава из одной изложницы в другую. Затем считая, что ПР для переброса металла между стыками изложниц, является элементом ЛК, разрабатывается КС РТЯ снятия оксидной пленки с поверхности магниевых расплава залитого в движущиеся изложницы ЛК.

На рисунке 4.35 показана КС РТЯ переброса струи металлического расплава из одной изложницы в другую. На этом рисунке ЛК аппроксимируется прямоугольником 1. Магниевый расплав заливается в движущиеся изложницы, установленные на ЛК 1 из наклонного тигля 2. В данном случае наклонный тигель не представляет помех для установки роботов. С учетом этого обстоятельства ПР для переброса струи металлического расплава, из одной изложницы в другую 3 привязан своим местоположением к ЛК.

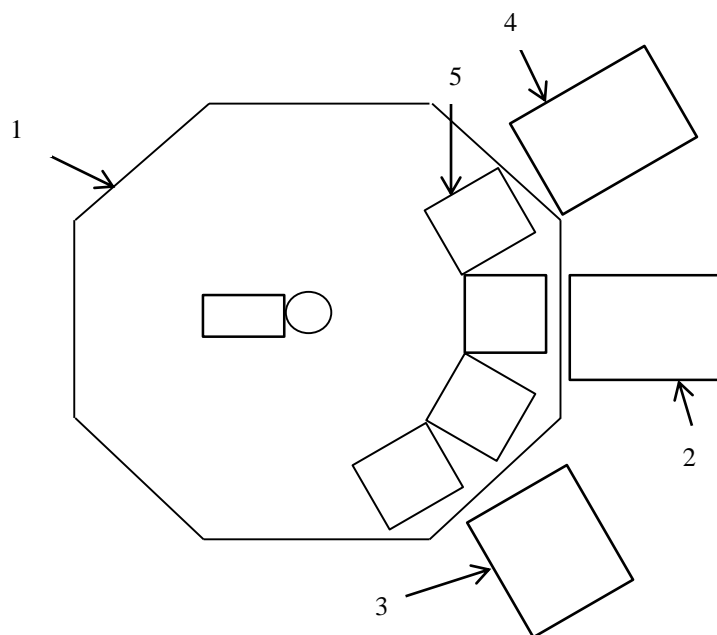


Рисунок 4.34 – Компонировочная схема РТК снятия оксидной пленки с поверхности неподвижных изложниц КРМ

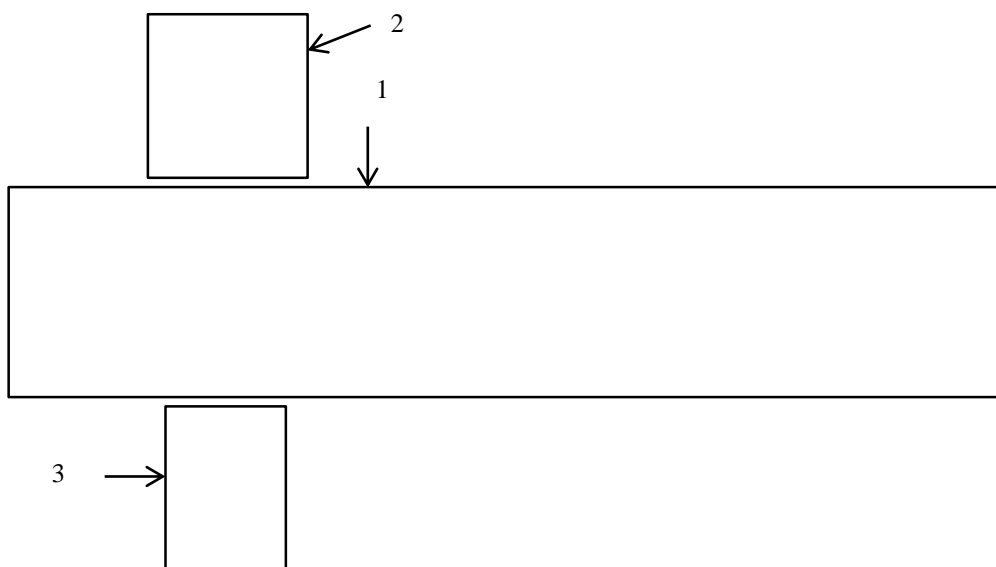


Рисунок 4.35 – КС РТЯ переброса струи магниевого расплава между стыками движущихся изложниц ЛК

Далее считаем, что и ПР для переброса струи металлического расплава из одной изложницы 3 представляет собой элемент ЛК. Это служит первоначальным расположением элементов ЛК для построения КС РТЯ снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава, залитого в движущиеся изложницы ЛК. С учетом, что на этой схеме показаны КС двух РТЯ, получим КС РТК производства товарного магния (рисунок 4.36).

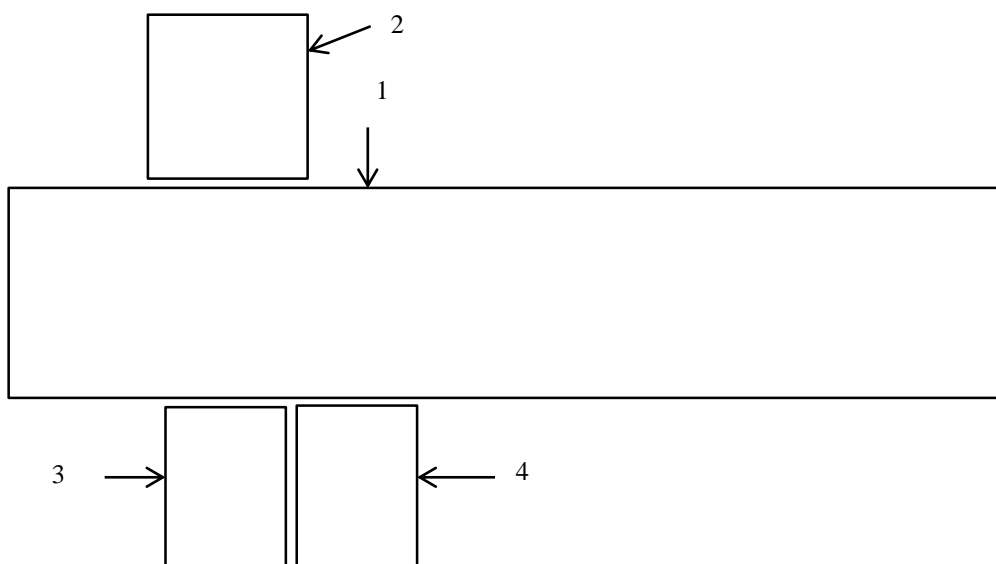


Рисунок 4.36 – КС РТК производства товарного магния

Как видно из вышеизложенного, в случае круглых форма, аппроксимация элементов РТК, многоугольниками становится приближенной, что не всегда допустимо.

ВЫВОДЫ

1. Разработано формализованное описание КС РТК при аппроксимации ПР и ТВО прямоугольными призмами, имеющими на плоскости производственной площади проекции в виде многоугольников.

2. Поставлена задача построения КС РТК в виде задачи оптимизации с функционалом минимизации расстояний между средними точками многоугольников аппроксимирующих ПР и ТВО, выполнения условий взаимного не пересечения этих многоугольников и охвата РП ПР всех требуемых точек позиционирования схвата ПР.

3. Разработан алгоритм построения КС РТК рассматриваемого класса ТП, при аппроксимации элементов РТК прямоугольными призмами.

Заключение

Анализ производств свинца, цинка и магния выявил ряд технологических операций, таких как снятия оксидной пленки с поверхности залитого в неподвижные изложницы свинцовых и цинковых расплавов, снятия оксидной пленки с поверхности залитого в движущиеся изложницы магниевой расплава, переброса струи магниевой расплава между стыками изложниц являющихся объектами роботизации. Данные технологические операции как объекты роботизации характеризуются:

- монотонностью и однообразностью выполняемых движений;
- сложностью и неизменностью геометрических конфигураций технологического оборудования;
- жёстким технологическим регламентом ведения производственных процессов;
- выполняются во вредных для здоровья работающего производственных условиях.

Одним из путей решения данной проблемы является применение промышленных роботов с учетом всех особенностей вышеперечисленных технологических операций. Учитывая важность максимального встраивания промышленного робота в технологическую цепочку, особую актуальность приобретают задачи формализованного описания геометрических характеристик, такие как рабочее пространство, габаритные размеры робота.

Эффективность решения этой проблемы прямо зависит от того: насколько рационально организован производственный процесс в целом, как комплексно и полно на всех звеньях технологической цепочки внедрены средства автоматизации и роботизации. С этой точки зрения важно стратифицированное представление процессов производства товарного свинца, цинка и магния. На основе стратифицированного представления возможен учет всех особенностей производства.

По результатам решения этой задачи можно сделать следующие выводы:

- 1) на основе анализа производств товарного свинца, цинка и магния выделены и описаны 4 страты, электромеханическая, гидродинамическая, теплотехническая, металлургическая с учетом взаимосвязей между собой;
- 2) разработано формализованное описание и алгоритм процедуры выбора модели серийно-выпускаемого промышленного робота по рабочему пространству с применением математического аппарата R - функций;
- 3) разработано формализованное описание и алгоритм процедуры построения компоновочной схемы роботизированного технологического

комплекса при аппроксимации её элементов прямоугольными цилиндрами и с применением математического аппарата R - функций;

4) разработано формализованное описание и алгоритм процедуры построения компоновочной схемы роботизированного технологического комплекса при аппроксимации её элементов прямоугольными призмами и с применением математического аппарата R - функций;

Полученные результаты могут быть при комплексной автоматизации и роботизации производственных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарбаев Н.А. 100 конкретных шагов по реализации пяти институциональных реформ. Доклад на расширенном заседании Правительства Республики Казахстан. Астана, 6 мая 2015 г.
2. Назарбаев Н.А. Послание Президента Республики Казахстан «Казахстанский путь – 2050: Единая цель, единые интересы, единое будущее» от 17 января 2014 года.
3. Государственная программа индустриально-инновационного развития Республики Казахстан 2015 – 2019 годов.
4. Бедельбаев А.К. Устойчивость нелинейных систем автоматического регулирования. Издательство АН Каз.ССР. Алма-Ата, 1960 – 163 с.
5. Ашимов А.А., Буровой И.А., и др. Автоматизированная система управления технологическими процессами производства серной кислоты из отходящих газов. М.: Metallurgiya, 1977 – 218 с.
6. Айсагалиев С.А. Анализ и синтез автономных нелинейных систем автоматического управления. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 244 с.
7. Айсагалиев С.А. Теория регулируемых систем. – Алматы: Қазак университеті, 2000. – 234 с.
8. Попков Ю.С., Ашимов А.А., Асаубаев К.Ш. Статистическая теория автоматических систем с динамической частотно-импульсной модуляцией, М., изд. Наука, 1988 – 254 с.
9. Сыздыков Д.Ж. Идентификация в ситемах управления. Алматы, Эверо – 2007. – 327 с.
10. Ашимов А.А., Соколова С.П. Введение в теорию систем автоматического управления с изменяющейся конфигурацией, Алматы: Ғылым, 1993 – 176 с.
11. Бейсенби М.А. Методы повышения потенциала робастной устойчивости. Астана, ЕНУ, 2011. – 352 с.
12. Кишнев В.В., Иванов В.А., Тохтабаев Г.М., Афанасьев А.А. Технические средства автоматики. М.: Metallurgiya, 1981. – 240 с.
13. Сулейменов Б.А. Интеллектуальные и гибридные системы управления технологическими процессами. Алматы: Шикүла, 2009. – 304 с.
14. Байгунчекөв Ж.Ж., Джолдасбеков У.А. Механизмы и манипуляционные устройства высоких классов. Алматы: Ғылым, 1996 – 34 с.
15. Шоланов К.С. Многоподвижные механизмы с замкнутыми кинематическими цепями. Алматы: Ғылым, 1999 – 149 с.
16. Иванов К.С. Механика адаптивных систем. Алматы: КазГосИНТИ, 2001. – 35 с.
17. Байбатшаев М.Ш. Роботоавтоматные системы в металлургии. Алматы, КазНТУ, 2002 – 187 с.
18. Козырев Ю.Г. Применение промышленных роботов. Издательство «Прспект», 2013. - 358 с.
19. Шиврин, Г.Н. Металлургия свинца и цинка. – М.: Metallurgiya. 1982. – 352 с.

20. Иванов А.И., Ляндрес М.Б., Прокофьев О.В. Производство магния. М.: Металлургия, 1979 г. – 301 с.
21. Эйдензон М.А. Металлургия магния и других легких металлов. М.: Металлургия, 1974. – 234 с.
22. Вяткин И.Л., Кечин В.А., Мушков С.В. Рафинирование и литье первичного магния. М.: Металлургия, 1974. – 191 с.
23. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. – 432 с.
24. Ашимов А.А., Байбатшаев М.Ш., Бейсембаев А.А. Стратифицированное описание роботоавтоматных систем в цветной металлургии. Тезисы докладов первой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLDS'2007, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, 2007г. – 118-119.
25. Бүрлібай А., Бейсембаев А.А. Декомпозиция процесса производства товарного магния на элементарные подпроцессы. Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. №6 Алматы, 2010. с. 71-74
26. Industrial robot parts, teach pendants, servo amps power supplies and more. Trend Robotics [Электронный ресурс]/ режим доступа: <http://www.trendrobotics.com/>
27. Бейсембаев А.А., Әсембай А.Ә. Стратифицированное описание литейного производства товарного магния. Вестник КазННТУ. №3(121) 2017. с. 183-190.
28. Робототехника /Ю.Д. Андрианов, Э.П. Бобриков, В.Н. Гончаренко и др. Под ред. Е.П. Попова, Е.И Юревича. М.: Машиностроение – 1984 – 288 с.
29. Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов.- М.: Высшая школа, 1986.-264 с.
30. Макаров И.М., Попов Е.П., Медведев В.С. Состояние и перспективы развития САПР промышленных роботов и ГПС. /В кн. Автоматизация проектирования и программирования роботов и ГПС.-М.: Наука, 1988. с.5-16.
31. Павловский В.Е., Бигдан Е.К., Прудковский С.Г., Романов В.А. Многофункциональный программный комплекс моделирования и оптимизации подсистем ГПС. /В кн. Автоматизация проектирования и программирования роботов и ГПС. М.: Наука, 1988. с. 59- 70.
32. Mikell P. Groover Principles of modern manufacturing: SI version. John Wiley&Sons; 4th Edition, 2010. - 1024 p.
33. Шаров, К.В. Промышленные роботы в литейном производстве : учеб. пособие / К.В. Шаров, А.В. Богомяков, Д.О. Пустовалов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – 125 с
34. Карташев В.А., Павловский В.Е., Платонов А.К. Сазонов В.В., Соколов С.М., Ярошевский В.С. Опыт создания алгоритмов и программ для управления роботами (организация работ и пути повышения надежности роботов),: Препр. ИПМ, № 121. М.: 2016.-32 с.
35. Справочник по промышленной робототехнике: В 2-х кн. Кн.1/Под ред. Ш. Нофа.-М.: Машиностроение, 1989.-480 с.

36. Справочник по промышленной робототехнике: В 2-х кн. Кн.2/Под ред. Ш. Нофа.-М.: Машиностроение, 1990.-480 с.
37. Brogardth T., Robot Contraol Overview-An Industrial Perspective, Modeling, Identifi cation and Control, vol. 30, no. 3, 2009, p. 167–180.
38. Watanabe Toshihiko. Kobe seiko giho.//Kobe Steel Eng. Repts-1993.-43, №1.-с.1.
39. Heinemann H. Automatisiereu jar und weleher robotetype// AV: Arbeitsvorbereit.-1992.-29, №5.-с. 207-208.
40. Severin Hans Gerd. Auswahlkriterien fur Roboter.//F+H: Fordern und Heben.-1993.-43, №4.-с. 245-248.
41. The Japan Robot Association [Электронный ресурс] / режим доступа: <http://www.jara.jp/e/dl/2013.pdf>
42. Керимов А.Д. Экспертная система для выбора роботов в производстве алюминиевых испарителей.//Всес. науч. конф. "Интеллектуализация систем управления" (ИСУ-91), Баку, 18-20 июня, 1991 : Матер. конф. Баку, 1991.-с. 106.
43. Statistics, Market Analysis, Forecasts,Case Studies and Profitability of Robot Investment. World robotics [Электронный ресурс] / режим доступа: http://www.worldrobotics.org/downloads/2008_executive_summary.pdf
44. Шпур Г., Краузе Ф.-Л. Автоматизированное проектирование в машиностроении.-М.: Машиностроение, 1988.- 648 с.
45. Edward Red W., Gong Shao-Wei. Automated inverse-kinematics for robot off-line programming.//Robotica.-1994.12, №1.-с. 45-53.
46. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора.- М.: Наука, 1976.- 415с.
47. Джо Ли, Б. Уэр. Трехмерная графика и анимация. – 2-е изд. – М.: Вилямс, 2002. – 640 с.
48. Potentiale elektronischer illusionen.//Production. -1992. - №20.-с. 3.
49. Херн Д., Бейкер М.П., Компьютерная графика и стандарт OpenGL. – 3-е изд. – М.: 2005. – 1168 с.
50. Снук Г. 3-D ландшафты в реальном времени на C++, DirectX. – М.: Кудиц-пресс, 2007. – 368 с.
51. Никулина Е.А. Компьютерная графика. Модели и алгоритмы. СПб: Лань, 2017. – 708 с.
52. Богуславский А.Б., Манько С.В., Переслени С.А. Планирование целенаправленного движения манипуляционных роботов.//Вопр. упр. в сложн. техн. системах./Моск. ин-т радиотехн., электрон. и автомат. .-1992.-с. 79-87.
53. Рахманкулов В.З., Переслени С.А., Храмов Ю.Е. Программное обеспечение системы графического программирования роботов АПРОГРАФ. /В кн. Программное обеспечение промышленных роботов. М.: 1986. с. 102-111.
54. Рахманкулов В.З., Коржов Г.В., Карев А.А., Манько С.В. Геометрическое моделирование и независимое программирование роботов. //Программир. прикл. систем /РАН Науч. сов. по пробл. "Робототехн. и

автоматиз. пр-во".-М.:1992.-с. 128-136.

55. Макаров И.М., Рахманкулов В.З., Ахрем А.А. Виртуальное моделирование и интеллектуальное управление сложными компьютерными интегрированными системами. Информационные технологии и вычислительные системы. №2, 2007. – с. 11 – 24.

56. [Dearden R.](#), [Burbridge C.](#) Manipulation planning using learned symbolic state abstractions// Robotics and Autonomous Systems ISSN: 09218890 Year: 2014 Volume: 62 Issue: 3 Pages: 355-365 Provider: Elsevier DOI: 10.1016/j.robot.2013.09.015

57. Peter Simon Sapaty. Managing Distributed Dynamic systems with spatial GRASP technology. Springer International Publishing. 2017. – 248 p.

58. Kolud Bozena, G. Kost Gabriel. Computer aided detection of solids collision in FMS with robot by CAD simulation.//Zesz. nauk. Mech./PSI.-1992.-№108.-с. 359-366.

59. Nemec Bojan, Ruzic Anton, Ilc Vinko. RPL - an integrated environment of robot programming.//Informatica (Sloven).-1992.-16, №1.-с. 27-33.

60. [Martin P.](#), [Emami M.R.](#) Neuro-fuzzy approach to real-time trajectory generation for robotic rehabilitation// Robotics and Autonomous Systems ISSN: 09218890 Year: 2014 Volume: 62 Issue: 4 Pages: 568-578 Provider: Elsevier DOI: 10.1016/j.robot.2014.01.001.

61. Ozaki Hiroaki, Chiu Hua, Kawatsu Hidetaka. Nihon kikai gakkai ronbushu.//C. Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C. .-1993.-59, №557.-с. 165-170.

62. [Nadia Adnan Shiltagh](#), [Lana Dalawr Jalal](#). Path Planning of Intelligent Mobile Robot Using Modified Genetic Algorithm// International Journal of Soft Computing & Engineering ISSN: 22312307 Year: 2013 Volume: 3 Issue: 2 Pages: 31-36 Provider: DOAJ Publisher: International Journal of Soft Computing & Engineering

63. [Marco Pala](#), [Nafiseh Osati Eraghi](#), [Fernando López-Colino](#), [Alberto Sanchez](#). A Path Planning Algorithm for Low-Cost Autonomous Robot Navigation in Indoor Environments// ISPRS International Journal of Geo-Information ISSN: 22209964 Year: 2013 Volume: 2 Issue: 3 Pages: 729-748 Provider: DOAJ Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute DOI: 10.3390/ijgi2030729

64. RoboCAD 21, mas pvertacioes.//Autom. integr. e rev. rob. .-1992.-№65.-с. 31.

65. Ведмидь П.А., Сулинов А.В. Программирование обработки в NX CAM. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 304 с.

66. T.R. Vijayaram, Robots and Robotics in Foundries, Metalworld, Jan. 2012, p. 88–92.

67. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. Киев. Наукова думка: 1982.-530 с.

68. Байбатшаев М.Ш., Бейсембаев А.А., Балгабаев М.А., Ибрагимов Р.И. Выбор промышленных роботов по рабочим зонам./Вопросы создания АСУ технологическими процессами и предприятиями.- Алма-Ата, Каз.ПТИ, 1985. – с. 158-167.

69. Бейсембаев А.А., Эсембай А. Э. Формализованное описание и

алгоритм выбора модели промышленного робота при построении роботизированного технологического комплекса. Вестник КазНУ. №2(114) 2016. с. 366-374.

70. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Наука, МГТУ, 2000. – 400 с.

71. Юревич Е.И. Основы робототехники. БХВ-Петербург, 2010. – 360 с.

72. Иванов А.А. Основы робототехники. Изд-во ИНФРА-М. 2017. – 224 с.

73. Промышленная робототехника./Шифрин Я.А. и др.- М.: Машиностроение, 1982.- 415 с.

74. Байбатшаев М.Ш., Бейсембаев А.А., Эбуова Н.К. Манипулятор для съема оксидной пленки с поверхности магниевого расплава залитого в изложницы литейного конвейера производства товарного магния. Труды Международных Сатпаевских чтений «Роль и место молодых ученых в реализации стратегии «Казахстан – 2050», 3 том. Алматы, 2014. с. 16 – 23.

75. Бейсембаев А.А., Акышева Г.К., Омирбекова Ж.Ж., Бүрлибай А.Э. Устройство для измерения температуры движущихся изложниц литейного конвейера производства товарного магния. Вестник КазНУ им. К.И. Сатпаева, №2(90) Алматы, 2012. с.216-220.

76. Бейсембаев А.А., Ербосынова М.С., Эсембай А.Э. Алгоритм программного управления, устройством для измерения температуры движущихся изложниц, литейного конвейера производства товарного магния. Поиск. №4, 2014. с. 43-49.

77. Lee Jihong, Bien Zeungnam. Collision-free trajectory control for multiply robot based on neural optimization network.//Robotica.-1990.-8, №3.-с. 185-194.

78. Шахинпур М. Курс робототехники. -М.: Мир, 1990.-527 с.

79. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника.-М.: Мир, 1989.-624 с.

80. Бурдаков С.Ф., Харалдин Н.А. Планирование и оптимизация движений роботов методом конфигурационного пространства. //ИТВ СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012, №3. – с. 17 – 22.

81. Vukobratovic M. Kircanski M., Scientific Fundamentals of Robotics 3. Kinematics and Trajectory Synthesis of Manipulation Robots. Springer Science & Business Media. 2013 . – 268 p.

82. Voliois S.D., Christodoulou M.A. Continuous path planning via a non-inverting parallel algorithms.//Robotica.-1992.-10, №3.- с. 205-216.

83. Subramaniam M., Kramer S.N. The inverse kinematic solution of the tetrahedron based variable-geometry truss manipulator.//Trans. ASME J. Mech. Des. .-1992.-114, N3-с. 433-437.

84. Angeles Jorge. Die behandlung algebraischer singularitäten der kinematische, koordinatenumkehrung in der robotertechnik.//Wiss. Z. Univ., Rostock. Naturwiss. R. .-1990.-39, №6.-с. 41-52.

85. Cheng Fan-Tien, Chen Tsing-Hua, Sun York-Yih. Resolving manipulator redundancy under inequality constraints.//IEEE Trans. Rob. and Autom. .-1994.-10, №1.-с. 65-74.

86. Овакимян Л.Г. Решение обратной задачи о положении манипулятора градиентным спуском в пространстве обобщенных координат.//Проектир. механизмов и динам. машин /Моск. ин-т приборостр. -М.,1991.-с. 102-103.
87. Козлов В.В., Макарычев В.П., Тимофеев А.В., Юревич Е.И. Динамика управления роботами - М.: Наука, 1984.-336 с.
88. Ozaki Hiroaki, Chiu Hua, Kawatsu Hidetaka. Nihon kikai gakkai ronbunshu.//C. Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C. -1993.-59, №557.-с. 165-170.
89. Seshadri C., Ghosh Arindam. Minimum-time trajectory planning for two robots.//IECON'90 :16 th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Pacific Grove, Calif., Nov. 27-30, 1990. Vol. 1.- New York (n. Y.), 1990.-с. 676-681.
90. Mayorga R.V., Wong A.K.C. On the optimal trajectory planning for robot manipulators.//Rob. and Autom. :Proc. IASTED Int. Symp. Rob. and Autom., Lugano 29-july 1, 1989.-Anaheim etcm, -с. 20-24.
91. Tani Junji, Usuda Hiroki. Nihon kikai gakkai ronbunshu.//C.=Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C.-1992.-58, №556.c. 3655-3659.
92. Albrichsfeld C. von, Horsch T. Echtzeitfahige kollisionsvermeidende bahnplanung durch kombination globaler und localer methoden.//Robotersysteme.-1992.-8, №4.-с. 227-238.
93. Grudic Grevory Z., Lawrence Peter D. Iterative inverse kinematics with manipulator configuration control.//IEEE Trans. Rob. and Autom. -1993.-9, №4.-с. 476-483.
94. Long Mark K. Task-directed inverse kinematics for redundant manipulators.//J. Intell. and Rob. Syst.-1992.-6, №2-3.c. 241-261.
95. Lee Jihong, Bien Zeungnam. Collision-free trajectory control for multiply robot based on neural optimization network.//Robotica.-1990.-8, №3.-с. 185-194.
96. Галицкий М., Моряцкий А. Планирование движения манипулятора с избыточными степенями подвижности в среде с препятствиями.//Нелинейные задачи динам. машин /РАН Ин-т машиновед. -М.:1992.-с. 143-150.
97. Galicki Miroslaw. Optimal kinematic fini-time cjntrol of mobile manipulators. RoMoCo, 2017, 129 – 134
98. Galicki Miroslav, Morecki Adam. Collision-free motion planning of redundant manipulators in an unknown environment./23rd Int. Symp. Ind. Rob., Barcelona, 6th-9th Oct., 1992: Proc. -Barcelona, 1992.
99. Kozlovski Krzysztof K. (Ed.) Robot Motion and Control 2009. Springer&Business Media. 2009. – 478 p.
100. Lin Yun-Hui, Arimoto Suguru.//Нихон роботто гаккайси = J. Robot Soc. Jap. -1991.-9, №2.c. 184-191.
101. Shieh Meng-Dar, Duffy J. Autonomous rectilinear motion planning for a special robot: Path planning for a special 4R manipulator with a single spherical obstacle inside the workspace.//Trans. ASME J. Mech. Des. -1992.-114, №4.- с. 559-563.
102. Vukobratovic M., Stocich D. Scientific Fundamentals of Robotics 2. Control of Manipulation Robots. Theory and Application. Springer – Verlag Berlin Heidenberg New York. 2011 . – 562 p.

103. Wang Tao, Xing Xiaoling, Zhu Ang Xinhua//Jigiren=Robot.-1992.-14, №5.c. 50-55.
104. Kumar V. Characterization of workspace of parallel manipulators.//Trans. ASME T. Mech. Des.-1992.-114, №3-c. 368-375.
105. Muthuswamy S., Manoochehri S. Optimal path planning for robot manipulators.//Trans. ASME J. Mech. Des. .-1992.-114, №4.- c. 586-595.
106. Trabia Mohamed B. Planning near-minimum-length collision-free paths for robots.//IEEE Trans. Syst., Man. and Cybern.-1993.23, №5.c.143-148.
107. Newman Wyatt S., Branicky Michael S. Real-time configuration space transforms for obstacle avoidance.//Int. J. Rob. Res. .-1991.-10, №6.-c. 650-667.
108. Maciejewski Anthony A., Fox John J. Path planning and the topology of configuration space.//IEEE Trans. Rob. and Autom. .-1993.-9, №4.c.444-456.
109. Pedro Maria Teresa, Rosa Ricoroto Garcia. Robot path-planning in the configuration space with automatic obstacle transformation.//Cybern and Syst.-1992.-23, №3-4.-c. 367-378.
110. Mata V., Valero F. Algorithms for robot path planning among obstacles./23rd Int. Symp. Ind. Rob., Barcelona, 6th- 9th Oct., 1992: Proc. .- Barcelona, 1992. c. 743-747.
111. Sun Kang, Lumelsky Vladimir. Path planning among unknown obstacles: the case of a three-dimensional cartesian arm.//IEEE Trans. Rob. and Autom. .-1992.-8, №6.c.-776.
112. Geng Zhaofeng, Wu Yonggan.//Jigiren=Robot.-1992.- 14, №5. -c. 38-43.
113. Hwang Yong K., Ahuja Narendra. A potential field approach to path planning.//IEEE Trans. Rob. and Autom. .-1992.-8, №1.-c.- 23-32.
114. Jakobsen Niels, Overgaard Lars, Perram John. Controlling an n-axis robot in complex environments./23rd Int. Symp. Ind. Rob., Barcelona, 6th-9th Oct., 1992: Proc. .- Barcelona, 1992. c. 363-368.
115. Hohn Georg, Adolphs Peter. Verfahren zur kollisionsvermeidenen steuerung von aufgabenorientiert programmierten robotern: Заявка 0439654 ЕПВ, МКИ G 05 В 19/405; Sumens AG.-N90101917.4; Заявл. 31.01.90; Опубли. 07.08.91.
116. Jurisica Ladislav, Takacs Ronald. Konceptie riesenia inverznej kinematickej uiohy robota.//Automatizace.-1991.-34, №9-10.c. 244.
117. Popovic D., Heine R., Schare T., Wolter F. Suchverfahren zur rollisiousfreien babahnplannug fur ludustrieroboter.//Roboter systeme.-1992.-8, №2.-c. 67-73.
118. Tandirci Murat, Angeles Jorge, Darcovich John.//J. Intell. and Rob. Syst. .-1994.-9, №1-2.-c. 5-23.
119. Uzmay I., Yildirim S. Geometric and algebraic approach to the inverse kinematics of four-link manipulators.//Robotica.-1994.-12. №1,-c. 59-64.
120. Won J.H., Choi B.W., Chung M.J. A unified approach to the inverse kinematic solution for a redundant manipulator.//Robotica.-1993.-11, №2, c. 159-165.
121. Сыздыков Д.Ж., Байбатшаев М.Ш., Бейсембаев А.А. Синтез программных траекторий манипуляционного робота на основе описания

рабочих зон с применением R-функций./Моделирование и управление в гибких автоматизированных производствах и системах автоматического управления.: Межвуз. сб. науч. тр. МИРЭА.-М.: 1990.- с. 21-29.

122. Бейсембаев А.А. Синтез программных траекторий по степеням подвижности манипуляционного робота. Вестник КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2008 г. №6(1) Алматы, 2008. с.69-73.

123. Beysembaev A.A., Burlibay A. Programm trajectories of robot manipulator by using of Lagrang interpolation polynomials. Вестник КазНТУ им. К.И. Сатпаева, №6(94) Алматы, 2012. С.72-76.

124. Baybatchaev M., Dusembaev A., Beysembaev A. Modelling the robotic systems by methods of discrete analysis for special class of production processes./3rd International Workshop on advanced motion control. USA, California, Berkeley, 20-23 march, 1994.- с. 8.

125. Baybatchaev M., Dusembaev A., Beysembaev A. Modelling the robotic systems for special clas of production proceses./4th Islamic countries conference on statistical sciences. Pakistan, Lahore, 27-31 august, 1994.- с. 1.

126. Бейсембаев А.А. Описание рабочих пространств манипуляционного робота, имеющего три степени подвижности в виде логических выражений. Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия физико-математическая. №5 (273) Алматы, НАН РК, 2010. с. 80-87.

127. Бейсембаев А.А., Әсембай А.Ә. Формализованное описание и алгоритм построения компоновочной схемы роботизированного технологического комплекса. Вестник КазНТУ. №3(121) 2017. с. 557-563.

128. Архангельский А.Я. Программирование в Delphi для Windows. Издательство Бином-пресс. 2013. – 1248 с.

129. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М., Наука, 1976. – 872 с.

Приложение 1. – Таблица видов рабочих пространств 3-степенных промышленных роботов

	Кинематическая схема	Вид рабочего пространства ПР	Описание РП ПР в виде R - функции
	2	3	4
1			$\left(z - \frac{1}{2}a \geq 0\right) \cap_1 \left(\frac{3}{2}a - z \geq 0\right) \cap_1$ $\left(x - \frac{a}{2} \geq 0\right) \cap_1 \left(\frac{3}{2}a - x \geq 0\right) \cap_1$ $\left(y - \frac{1}{6}a \geq 0\right) \cap_1 \left(\frac{7}{6}a - y \geq 0\right) = 1$
2			$\left(x \geq 0\right) \cap_1 \left(\left(\frac{13a}{6}\right)^2 - (x^2 + y^2) \geq 0\right) \cap_1$ $\left((x^2 + y^2) - \left(\frac{7a}{6}\right)^2 \geq 0\right) \cap_1$ $\left(\frac{7}{6}a - z \geq 0\right) \cap_1 \left(z - \frac{1}{6}a \geq 0\right) = 1.$
3			$\left(\frac{7}{6}a - z \geq 0\right) \cap_1 \left(z - \frac{a}{6} \geq 0\right)$ $\cap_1 \left(\left(x - \frac{a}{6} < 0\right) \cap_1$ $\left(a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - (y - a)^2 \geq 0\right)\right)$ $\cup_1 \left(\left(x - \frac{a}{6} \geq 0\right) \cap_1$ $\left(4a^2 - \left(x - \frac{a}{6}\right)^2 - y^2 \geq 0\right) \cap_1$ $\left(\left(x - \frac{a}{6}\right)^2 + (y + a)^2 - a^2 \geq 0\right)\right)$ $= 1$
4			$\left(\left(\frac{13a}{6}\right)^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 - x^2 - y^2 \geq 0\right)$ \cap_1 $\left(\left(z - \frac{a}{6}\right)^2 + x^2 + y^2 - \left(\frac{7a}{6}\right)^2 \geq 0\right)$ $\cap_1 (y \geq 0) = 1$

Продолжение приложения 1.

	2	3	4
5			$\left(\left(z - \frac{7}{6}a \geq 0 \right) \cap_1 \right.$ $\left(8a^2(x^2 + y^2) - \left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + x^2 + y^2 + 3a^2 \right)^2 \leq 0 \right.$ $\cup_1 \left((x^2 + y^2 - a^2 \geq 0) \cap_1 \right.$ $\left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + x^2 + y^2 - 3a^2 \right)^2 \leq 0 \right)$ $\cap_1 \left(z - \frac{7}{6}a < 0 \right) \cup_1 \left(\left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + x^2 + y^2 \geq 0 \right)$ $\cap_1 (z + 2a \geq 0) \cap_1 \left(z - \frac{7}{6}a < 0 \right) \cup_1$ $\left((x^2 + y^2 - a^2 \geq 0) \cap_1 (z + 2a \geq 0) \right.$ $\left. \cap_1 \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + x^2 + y^2 \right)^2 \leq 0 \right) = 1.$
6			$(x \geq 0) \cap_1 \left(\left(\frac{13a}{6} \right)^2 - (x^2 + y^2) \geq 0 \right) \cap_1$ $\left((x^2 + y^2) - \left(\frac{7a}{6} \right)^2 \geq 0 \right) \cap_1$ $\left(\frac{7}{6}a - z \geq 0 \right) \cap_1 \left(z - \frac{1}{6}a \geq 0 \right) = 1.$
7			$\left(\left(x - \frac{a}{6} \geq 0 \right) \cap_1 \right.$ $\left(4a^2 - \left(z - \frac{a}{6} \right)^2 + \left(x - \frac{a}{6} \right)^2 + y^2 \leq 0 \right) \cap_1$ $\left(a^2 - \left(x - \frac{a}{6} \right)^2 - y^2 - \left(z + \frac{5a}{6} \right)^2 \geq 0 \right) \cup_1$ $\left(\left(x - \frac{a}{6} < 0 \right) \cap_1 \right.$ $\left. \left(a^2 - \left(x - \frac{a}{6} \right)^2 - y^2 - \left(z - \frac{7a}{6} \right)^2 \leq 0 \right) \right) = 1.$
8			$\left(\left(z - \frac{a}{6} \geq 0 \right) \cap_1 \left(\frac{7a}{6} - z \geq 0 \right) \right) \cap_1$ $\left((x \geq 0) \cap_1 \left(4a^2 - \left(x - \frac{a}{6} \right)^2 - y^2 \geq 0 \right) \right.$ $\left. \cap_1 \left(x - \frac{a}{6} \right)^2 + y^2 + 2a^2 \geq 0 \right)$ $\cup_1 ((x < 0) \cap_1$ $\left(\left(2a^2 - \left(x - \frac{a}{6} \right)^2 - \left(y - \frac{7a}{6} \right)^2 \geq 0 \right) \right.$ $\left. \cup_1 ((x < 0) \cap_1 \right.$ $\left. \left(\left(2a^2 - \left(x - \frac{a}{6} \right)^2 - \left(y + \frac{5a}{6} \right)^2 \geq 0 \right) \right) = 1.$

Продолжение приложения 1.

	2	3	4
9			$\left((z \geq 0) \cap_1 \left(x^2 + y^2 - \frac{25a^2}{36} \geq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 - \frac{14a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 + \frac{35a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \right) \\ \left((z < 0) \cap_1 \left(x^2 + y^2 - \frac{25a^2}{36} \geq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 - \frac{14a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 + \frac{35a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \right) = 1.$
10			$\left(\left(\frac{a}{6} - z \geq 0 \right) \cap_1 \left(\frac{a}{6} + z < 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 - \frac{14a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 + \frac{35a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \right) \\ \left(\left(\frac{a}{6} + z \geq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 - \frac{14a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + z^2 + \frac{35a^2}{36} \right)^2 \leq 0 \right) \right) = 1.$
11			$(x \geq 0) \cap_1 \left((x^2 + y^2 - a^2 \geq 0) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + z^2 - a^2)^2 \geq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + z^2 - 8a^2)^2 \leq 0 \right) \right) \\ \cup_1 \left((x^2 + y^2 - a^2 < 0) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + z^2 - a^2)^2 \geq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + (z - 2a)^2)^2 \leq 0 \right) \right) \\ \cup_1 \left((x^2 + y^2 - a^2 < 0) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + z^2 - a^2)^2 \geq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + (z + 2a)^2)^2 \leq 0 \right) \right) = 1.$
12			$(x \geq 0) \cap_1 \left((a^2 - x^2 - y^2 \geq 0) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{7a}{6} \right)^2 \right)^2 \leq 0 \right) \cap_1 \right. \\ \left. \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z + \frac{5a}{6} \right)^2 \right)^2 \geq 0 \right) \right) \cap_1 \\ \left(4a^2(x^2 + y^2) - \left(x^2 + y^2 + \left(z - \frac{a}{6} \right)^2 - 3a^2 \right)^2 \leq 0 \right) = 1$

Продолжение приложения 1.

	2	3	4
13			$((x \geq 0) \cap_1 (z - \frac{a}{6} \geq 0) \cap_1 (x^2 + y^2 + (z - \frac{a}{6})^2 - 2a^2 \geq 0) \cup_1 (4a^2 - x^2 - y^2 - (z - \frac{a}{6})^2 \geq 0) \cup_1 ((x \geq 0) \cap_1 (z - \frac{a}{6} < 0) \cap_1 (x^2 + y^2 + (z - \frac{a}{6})^2 - 2a^2 \geq 0) \cap_1 (4a^2(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + (z - \frac{a}{6})^2)^2 \leq 0)) = 1$
14			$((x \geq 0) \cap_1 (4a^2 - x^2 - y^2 - (z - \frac{a}{6})^2 \geq 0) \cap_1 (x^2 + y^2 + (z - \frac{7a}{6})^2 - a^2 \geq 0) \cup_1 ((x < 0) \cap_1 (x^2 + y^2 + (z + \frac{5a}{6})^2 - a^2 \geq 0)) = 1.$
15			$((x \geq 0) \cap_1 (4a^2 - x^2 - y^2 - (z - \frac{a}{6})^2 \geq 0) \cap_1 (x^2 + y^2 + (z - \frac{7a}{6})^2 - 2a^2 \geq 0) \cup_1 ((x < 0) \cap_1 (\frac{a^2}{9}(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + (z - \frac{7a}{6})^2 - \frac{8a^2}{9})^2 \leq 0) \cup_1 (\frac{a^2}{9}(x^2 + y^2) - (x^2 + y^2 + (z + \frac{5a}{6})^2 - \frac{8a^2}{9})^2 \leq 0)) = 1$
16			$(x \geq 0) \cap_1 \left(\left(\frac{13a}{6} \right)^2 - (x^2 + y^2) \geq 0 \right) \cap_1 \left((x^2 + y^2) - \left(\frac{7a}{6} \right)^2 \geq 0 \right) \cap_1 \left(\frac{a}{6} - z \geq 0 \right) \cap_1 \left(z + \frac{5}{6}a \geq 0 \right) = 1.$

Продолжение приложения 1.

	2	3	4
17			$(x \geq 0) \cap_1 \left(\frac{49a^2}{36} - x^2 - y^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 \geq 0 \right) \cap_1$ $\left(x^2 - y^2 - \left(z - \frac{a}{6}\right)^2 - \frac{a^2}{36} \geq 0 \right) = 1$
18			$(x \geq 0) \cap_1 \left(\left(\frac{7a}{6}\right)^2 - (x^2 + y^2) \geq 0 \right) \cap_1 \left((x^2 + y^2) - \left(\frac{a}{6}\right)^2 \geq 0 \right)$ $\cap_1 \left(\frac{7}{6}a - z \geq 0 \right) \cap_1 \left(z - \frac{1}{6}a \geq 0 \right) = 1.$

Приложение 2 - Блок-схемы процедур моделирования РП ПР

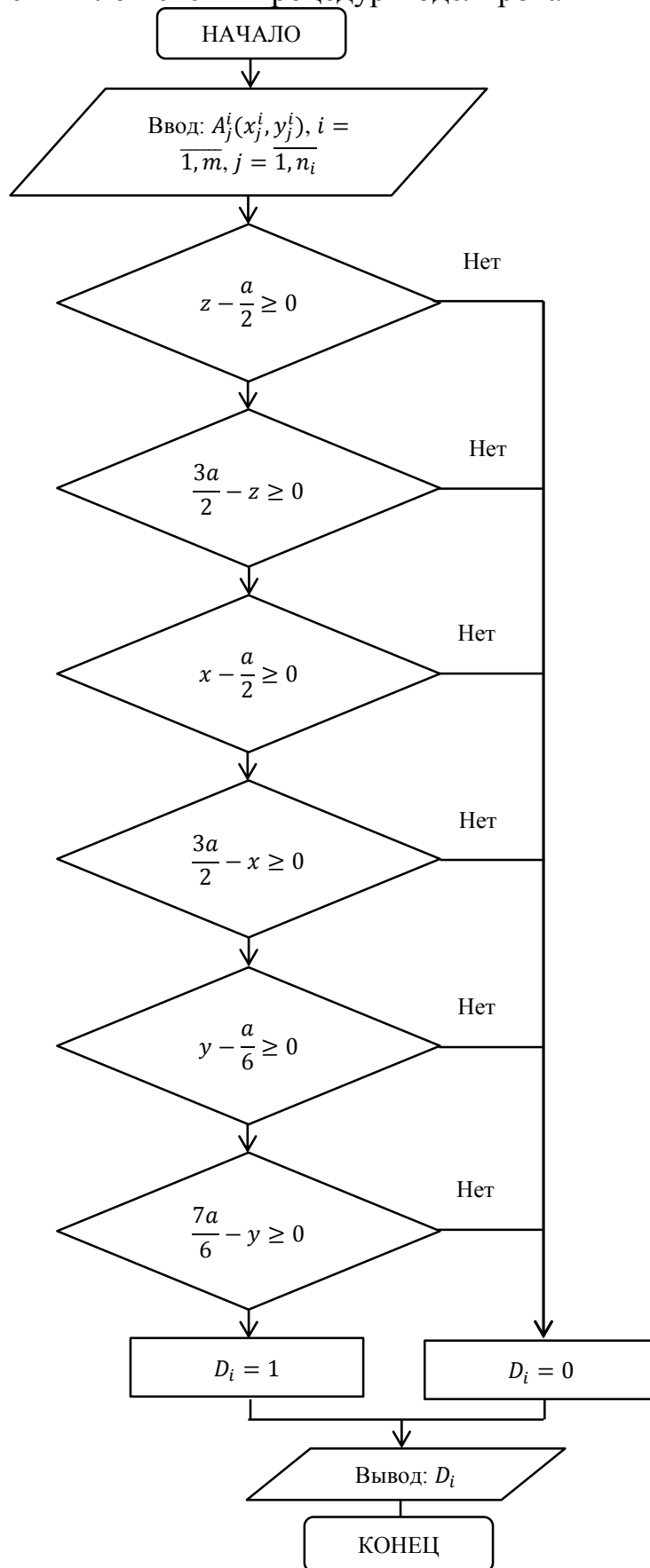


Рисунок П 2.1. – Блок-схема процедуры РП – 1.

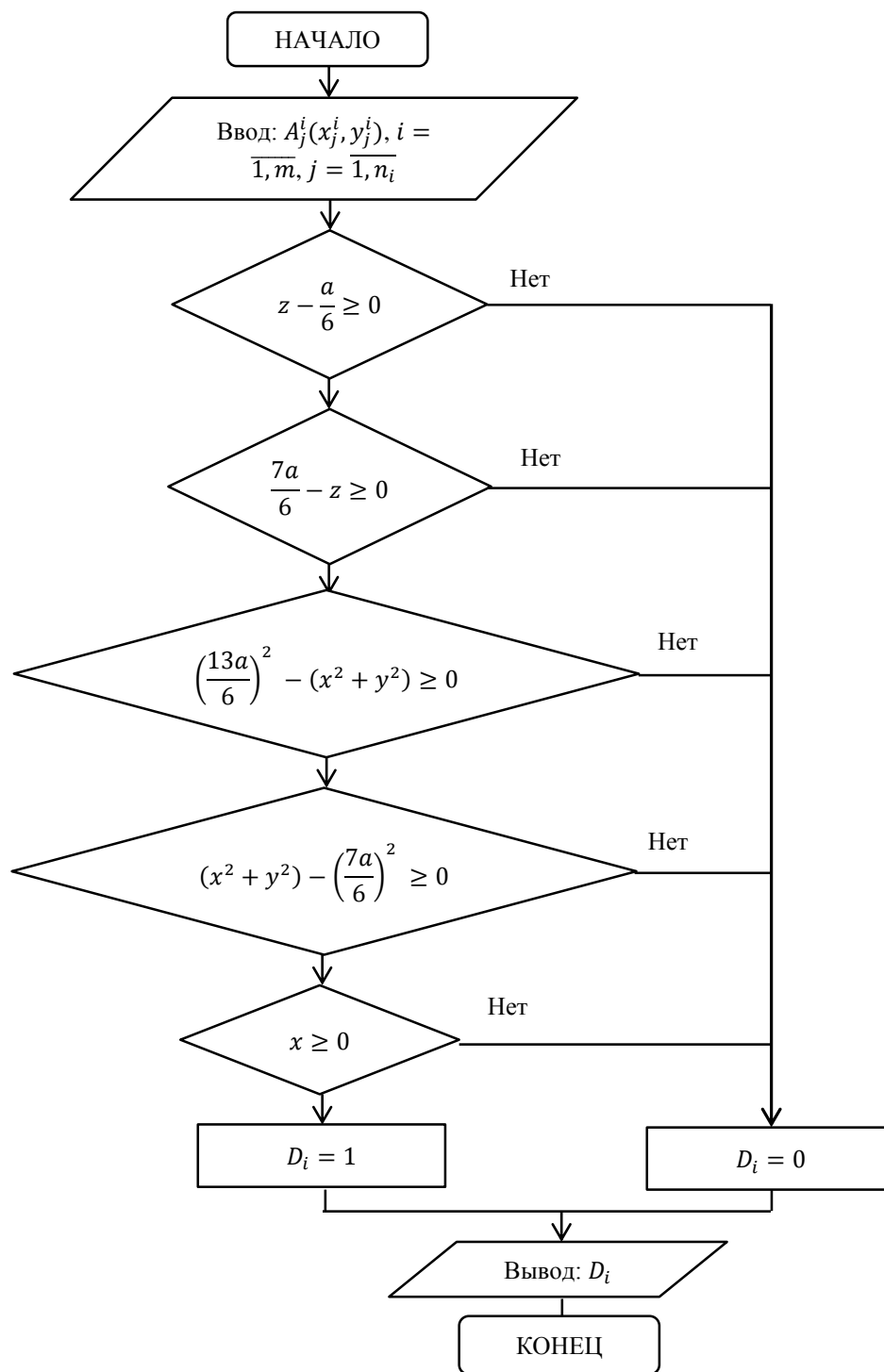


Рисунок П2.2. – Блок-схема процедуры РП – 2.

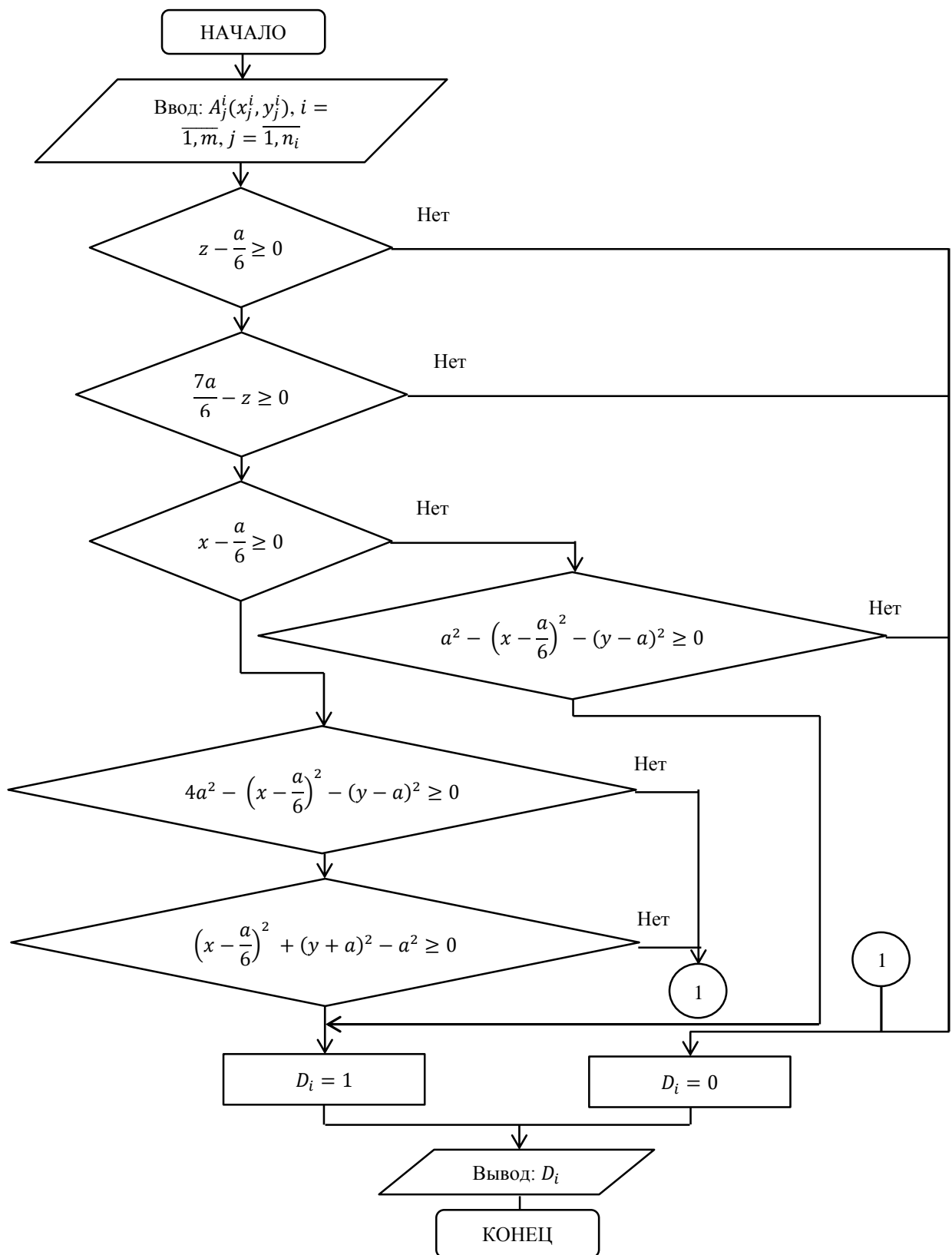


Рисунок П2.3. – Блок-схема процедуры РП – 3.

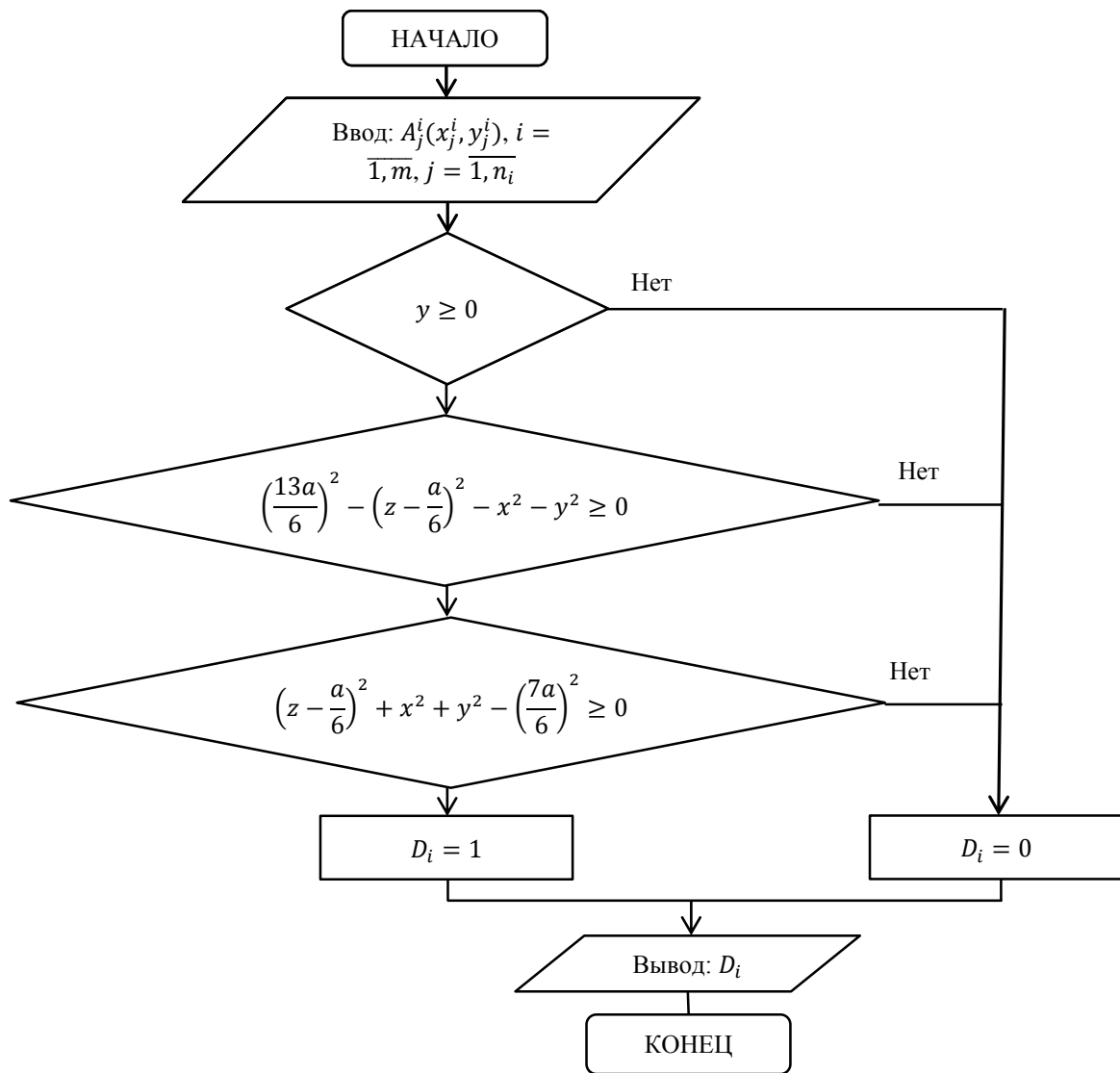
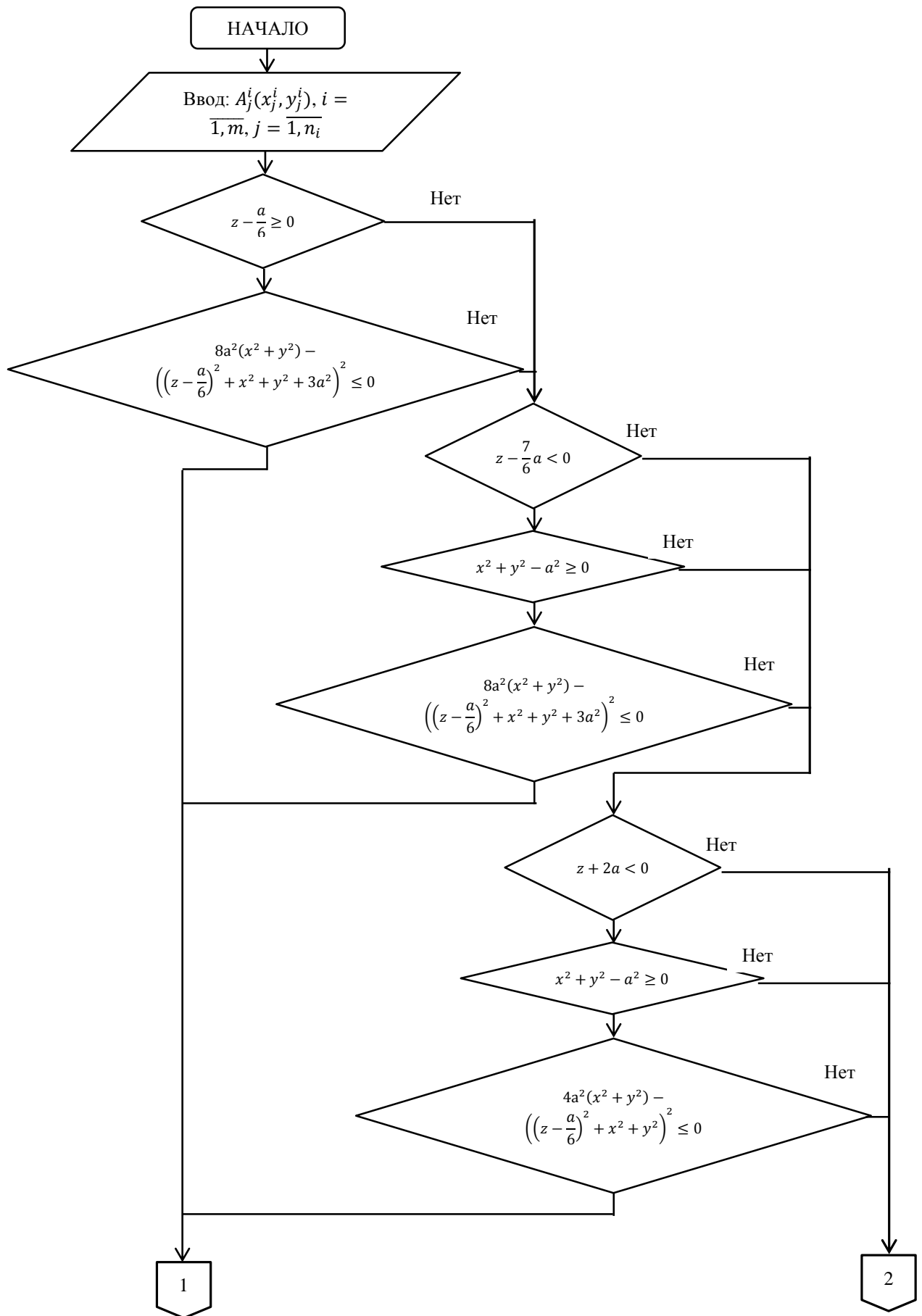


Рисунок П2.4. – Блок-схема процедуры РП – 4.



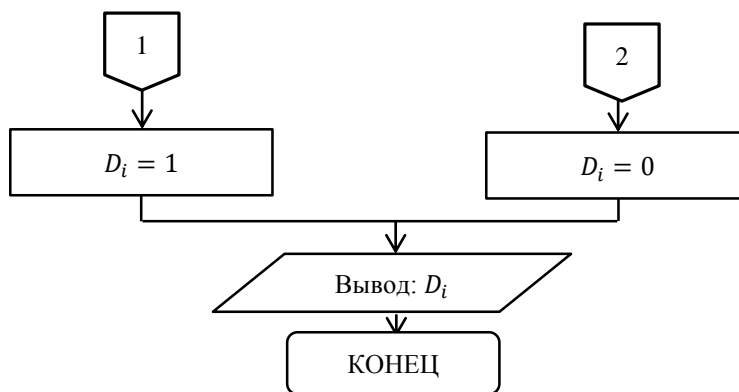
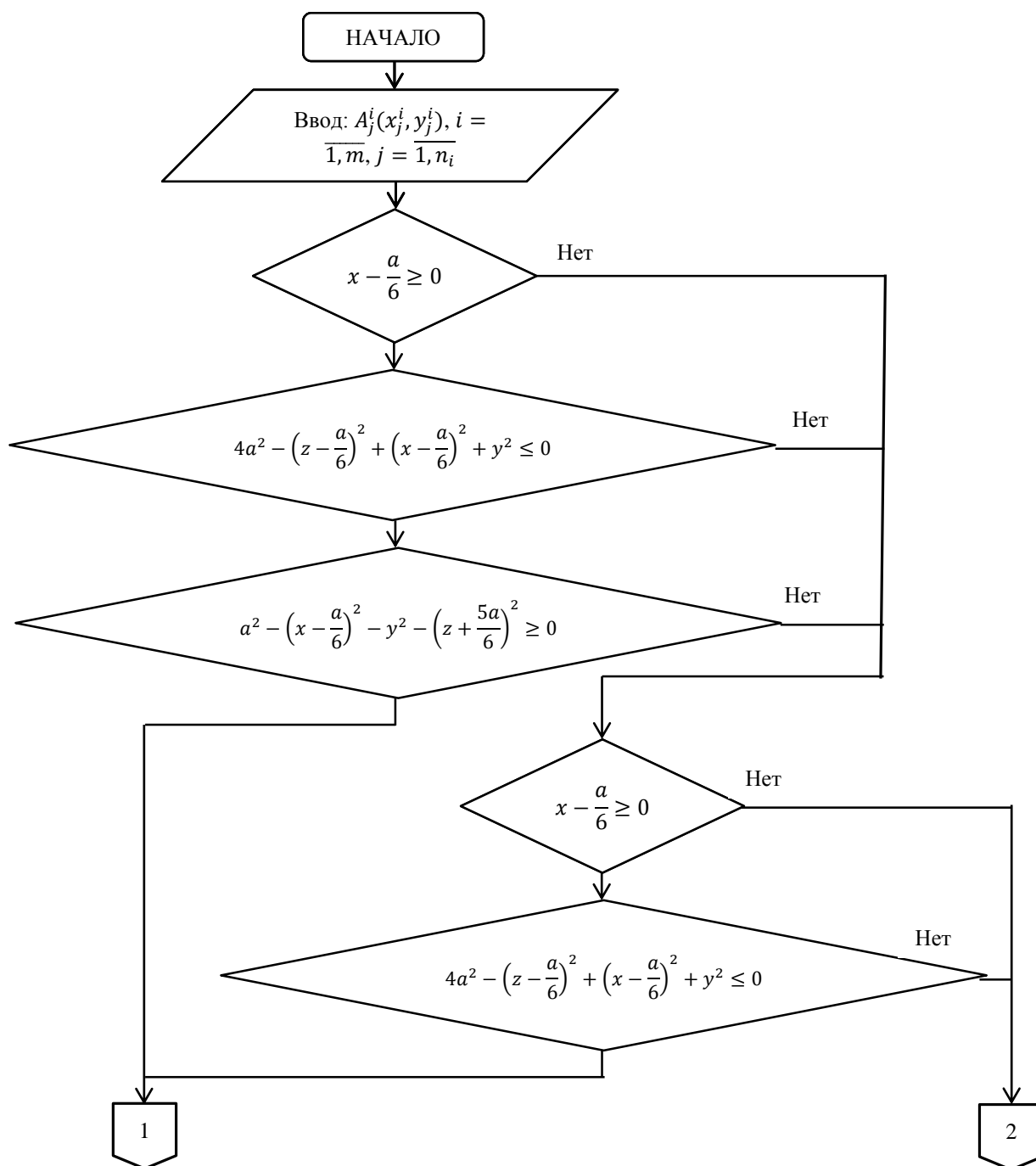


Рисунок П2.5. – Блок-схема процедуры РП – 5.



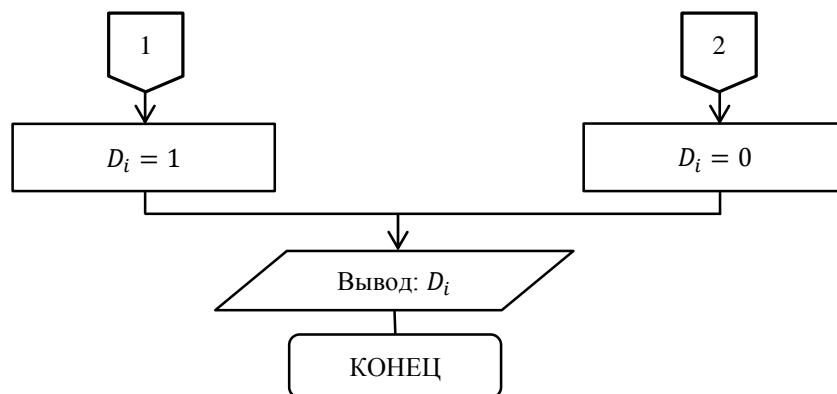
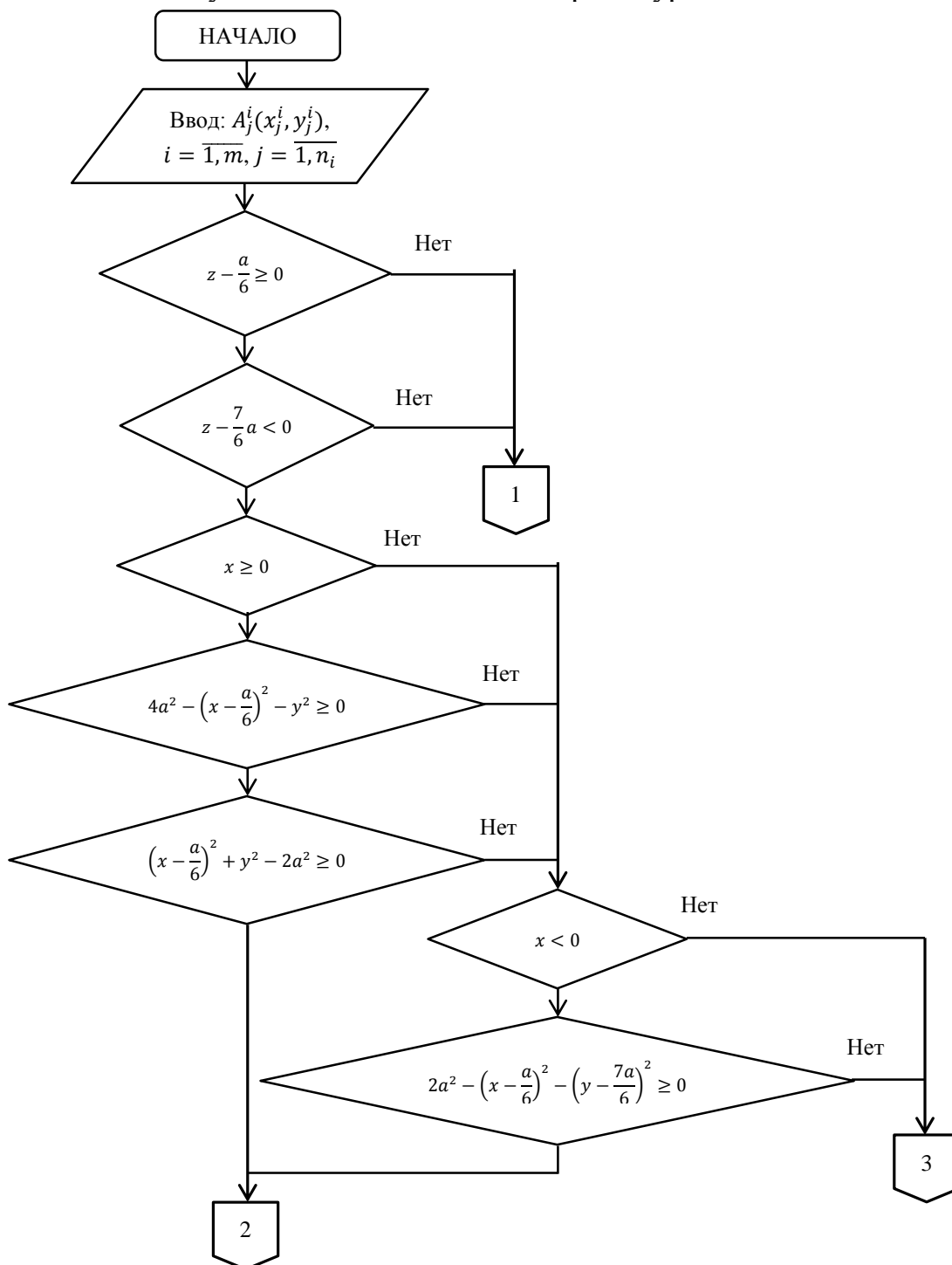


Рисунок П2.6. – Блок-схема процедуры РП – 6.



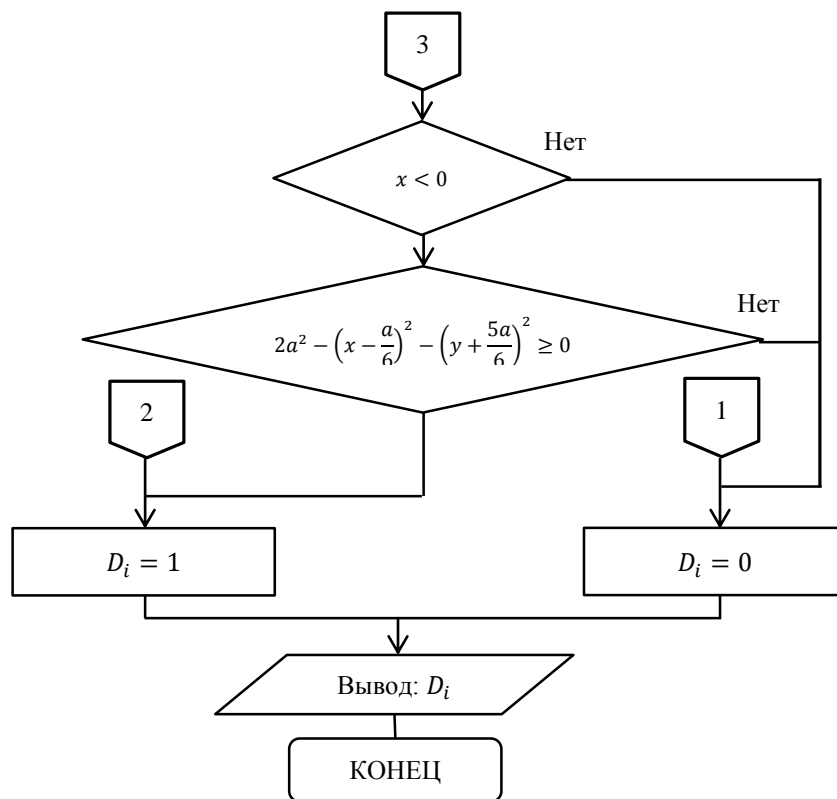
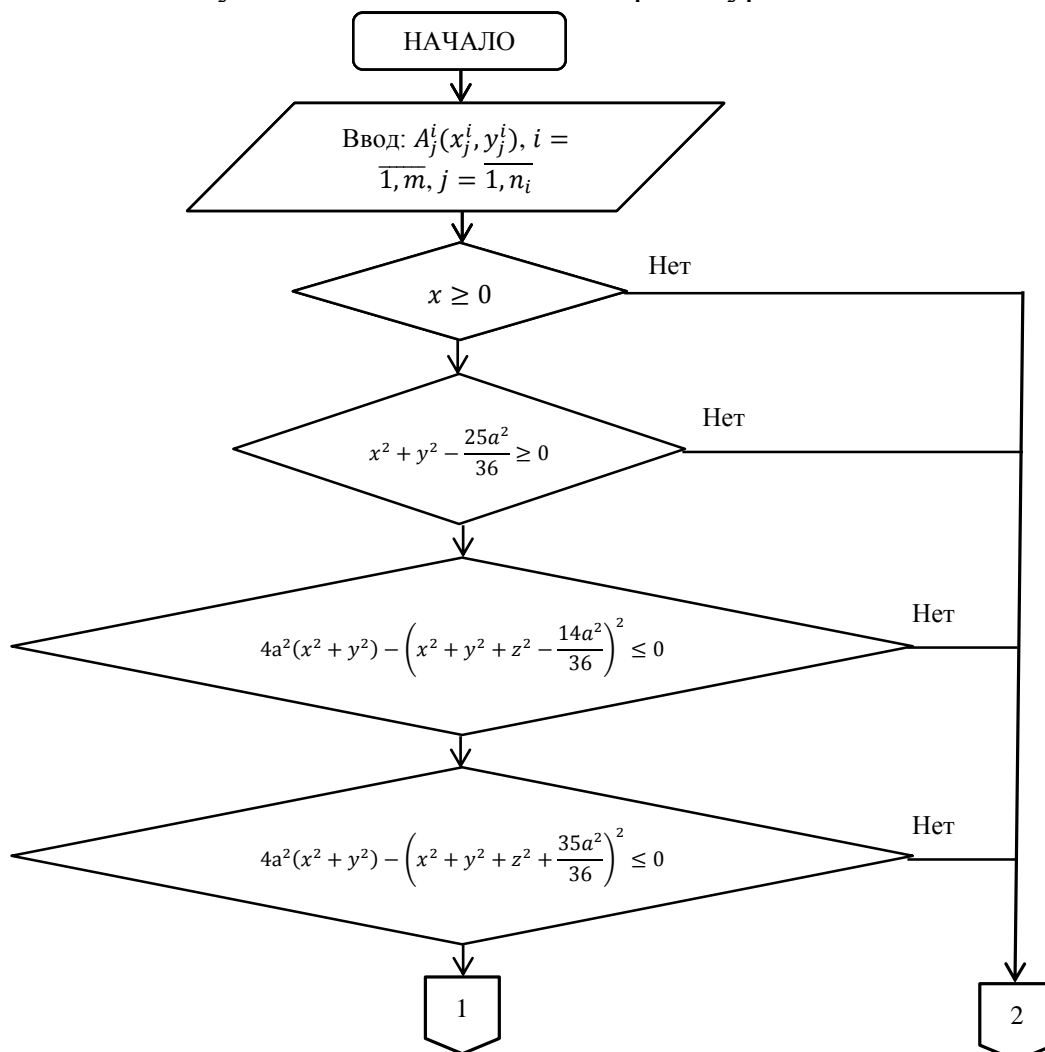


Рисунок П2.7. – Блок-схема процедуры РП – 7.



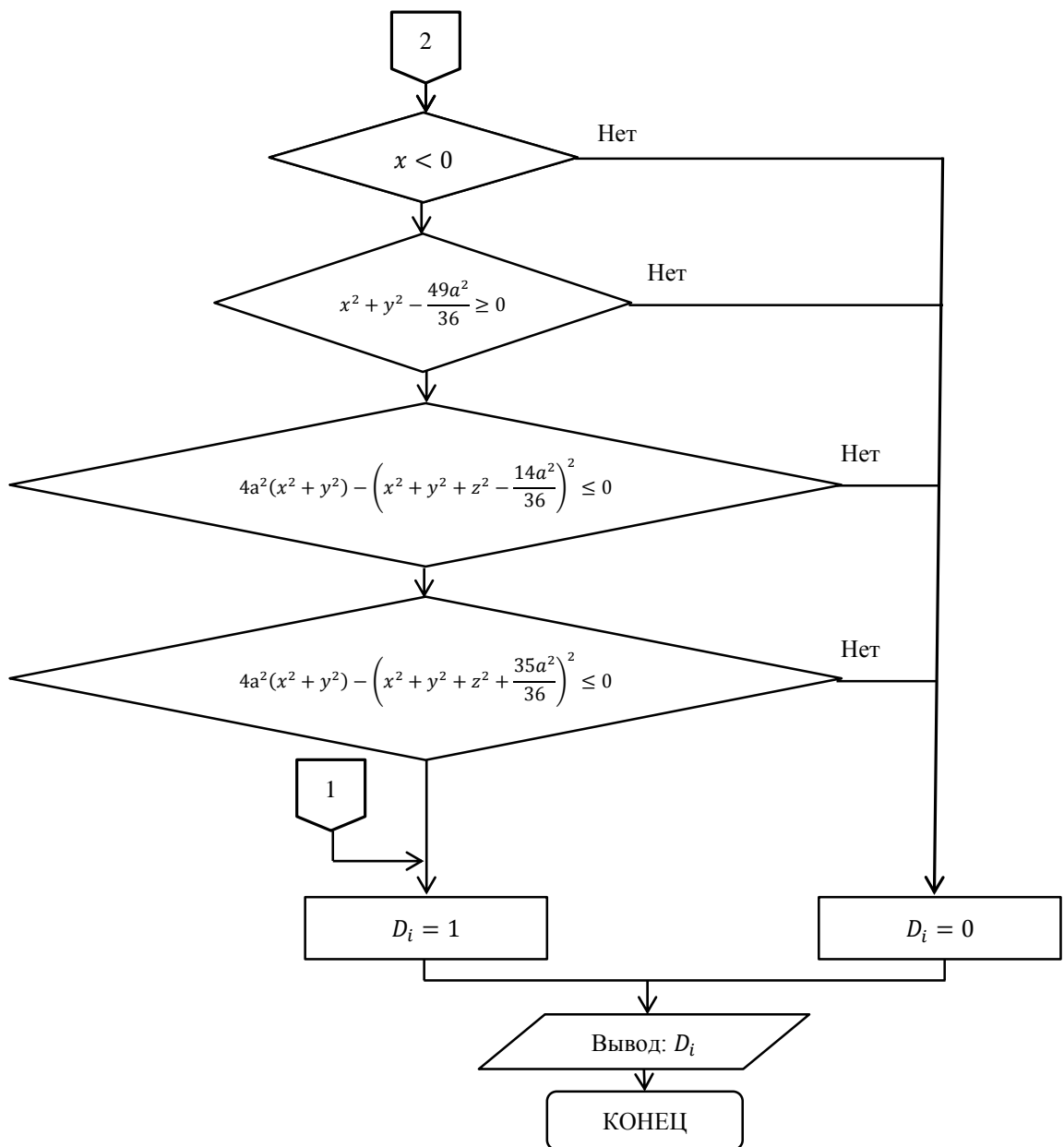
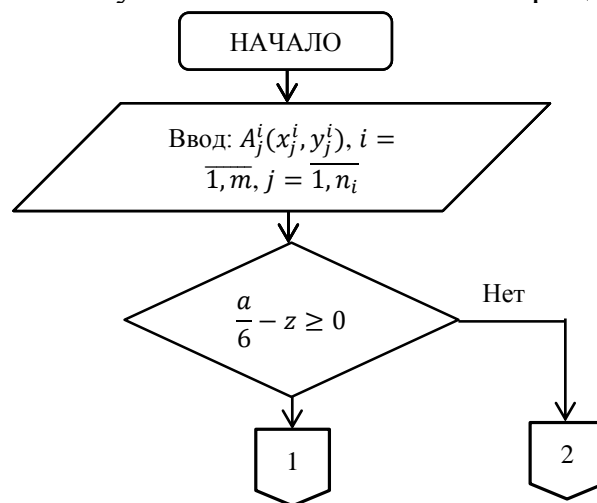


Рисунок П2.8. – Блок-схема процедуры РП – 8.



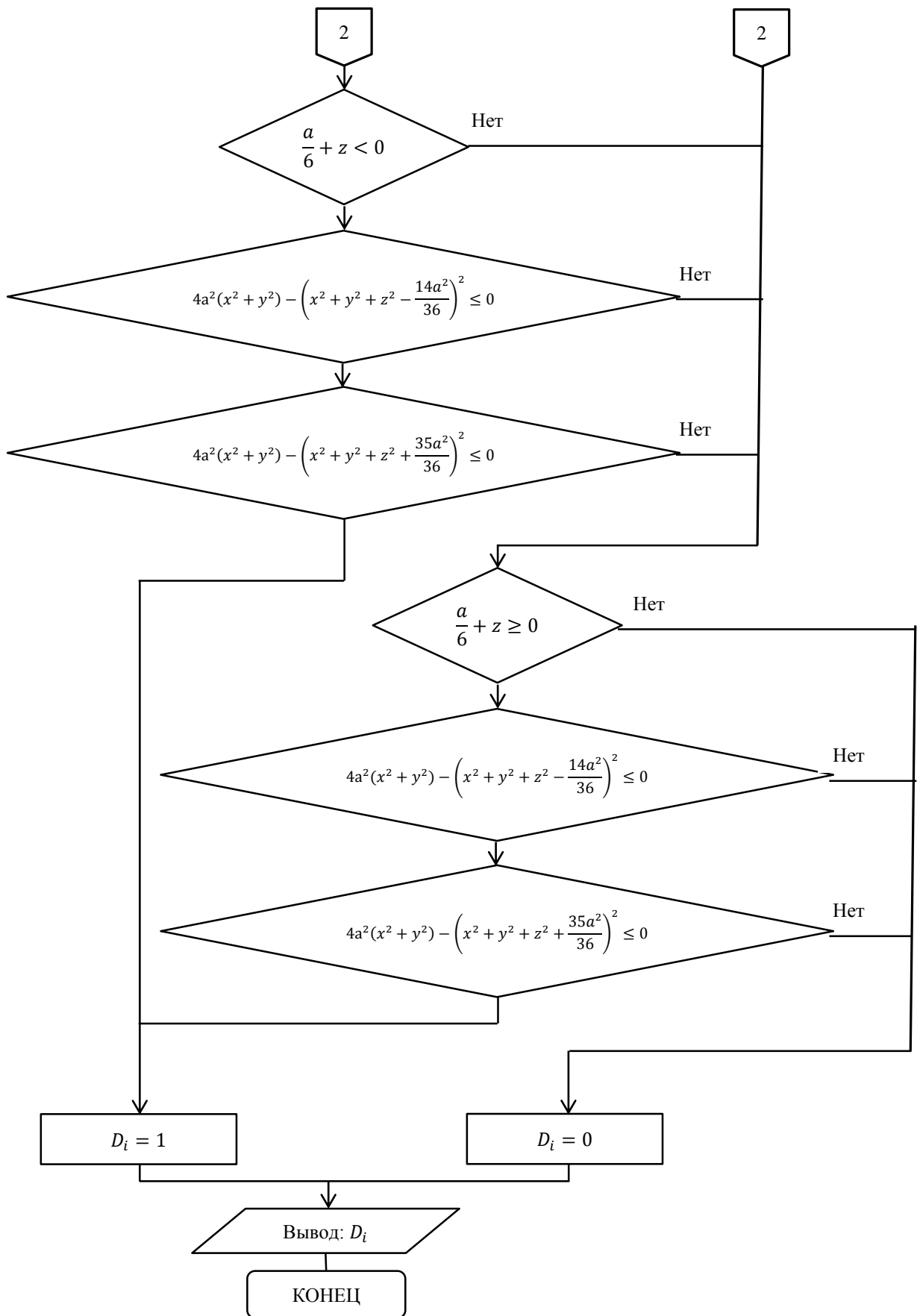
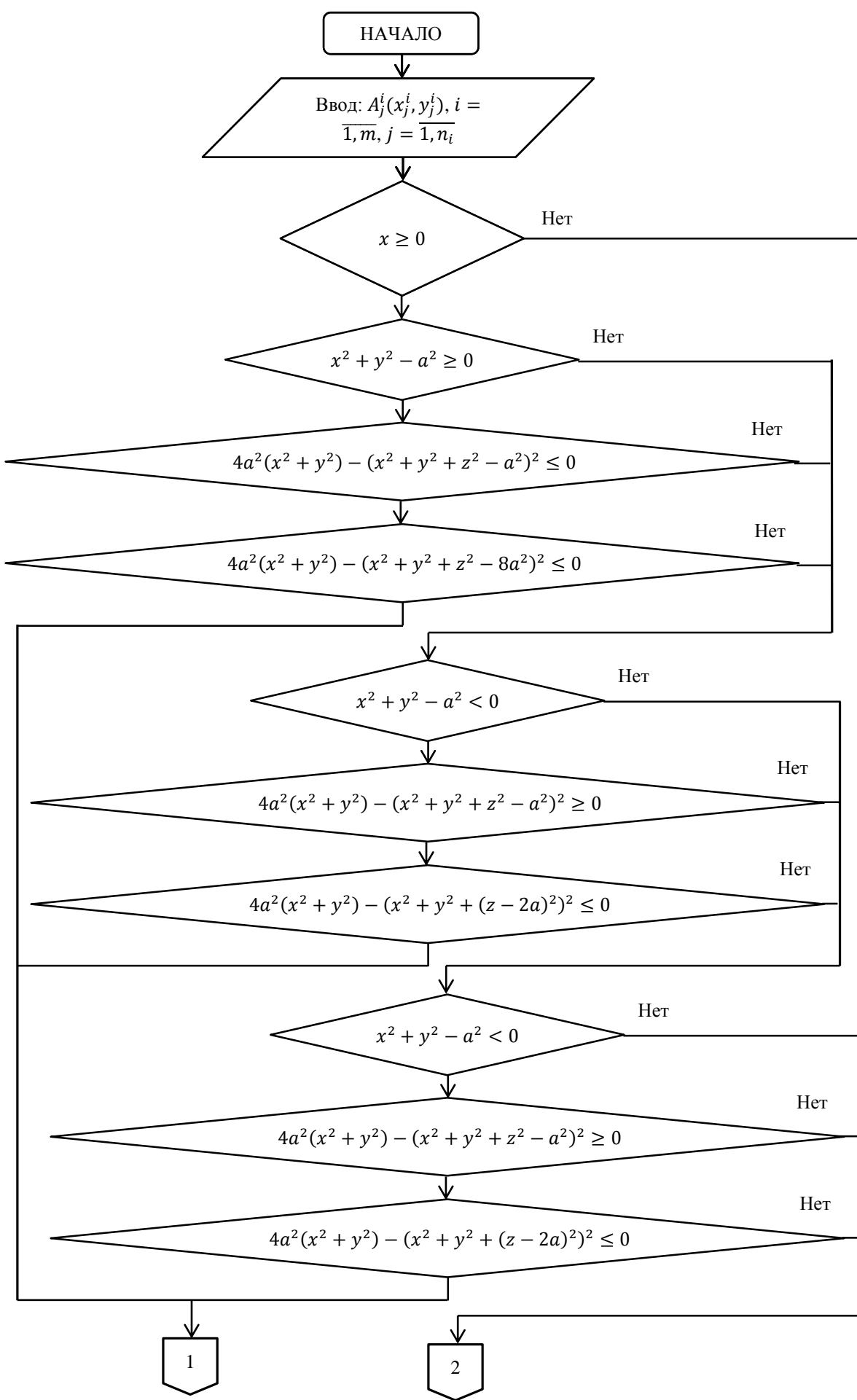


Рисунок П2.9. – Блок-схема процедуры РП – 9.



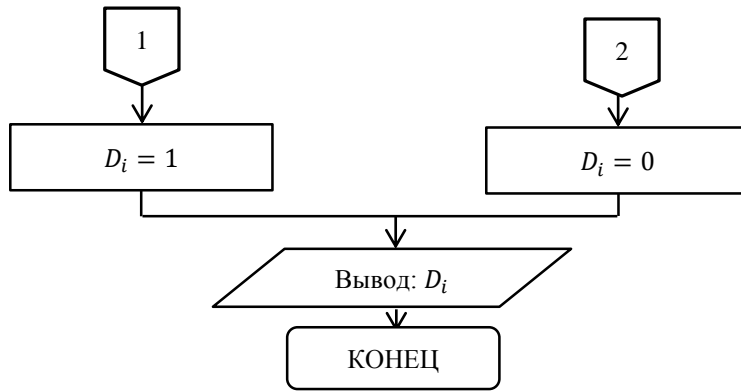
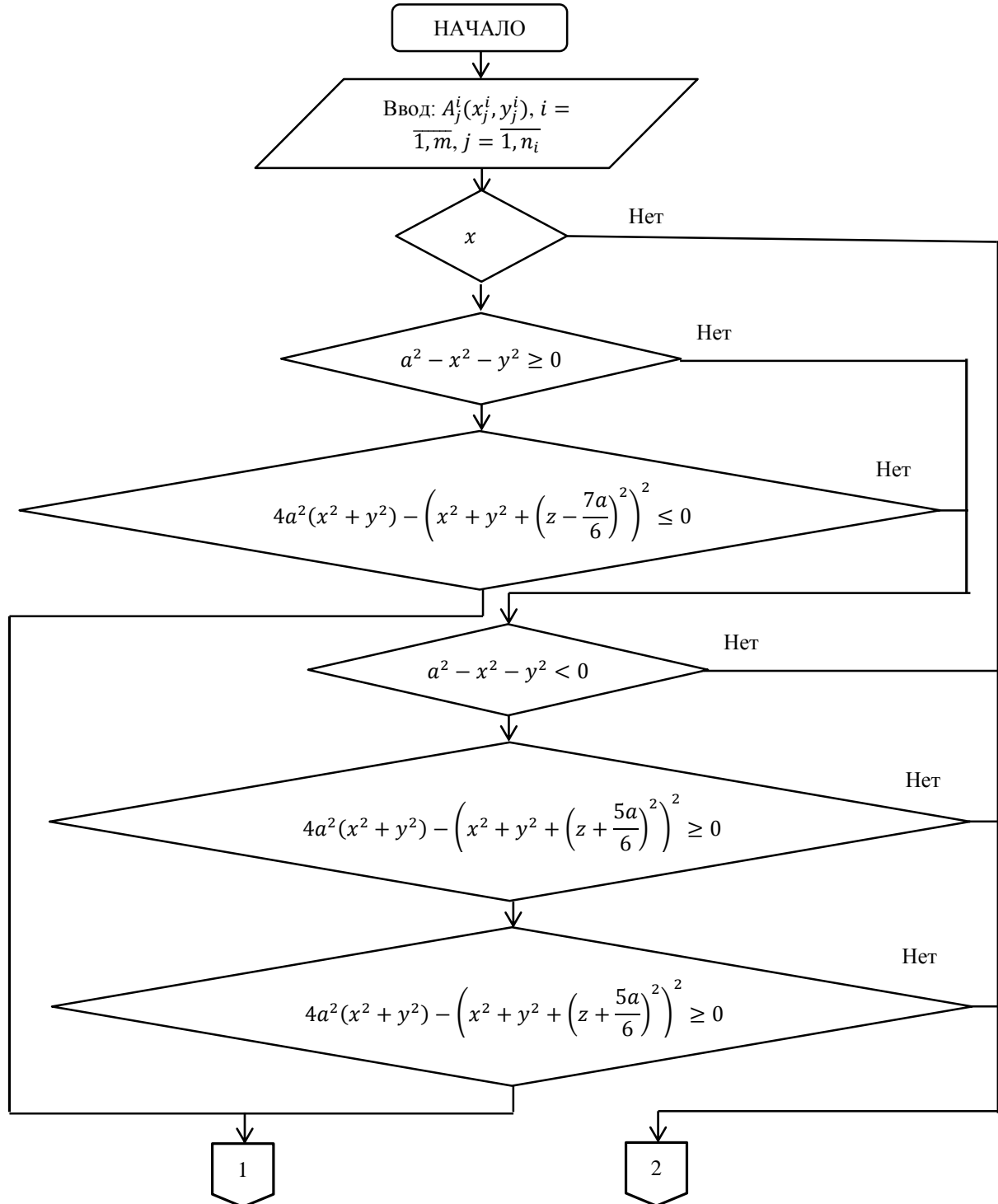


Рисунок П2.10. – Блок-схема процедуры РП – 10.



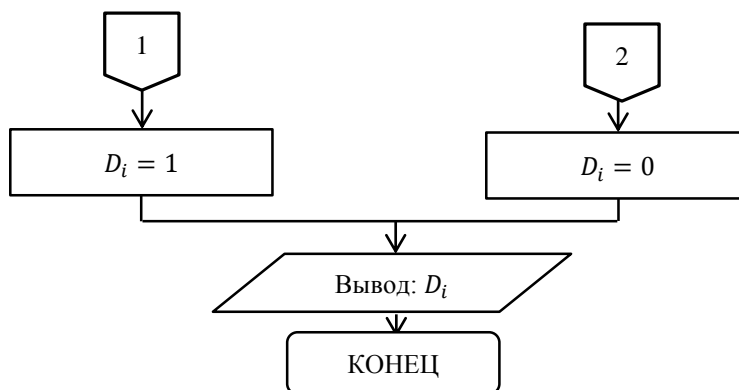
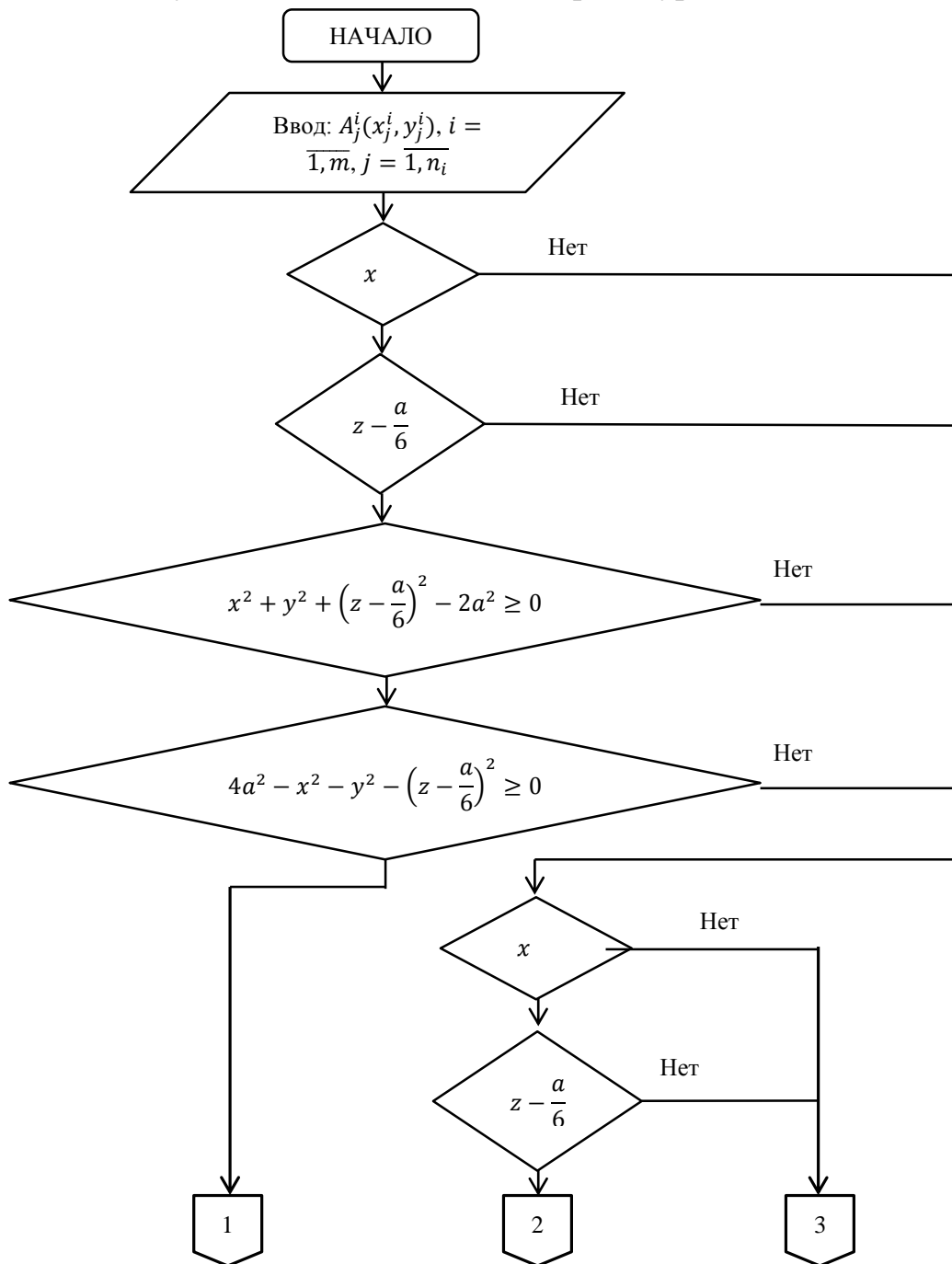


Рисунок П2.11. – Блок-схема процедуры РП – 11.



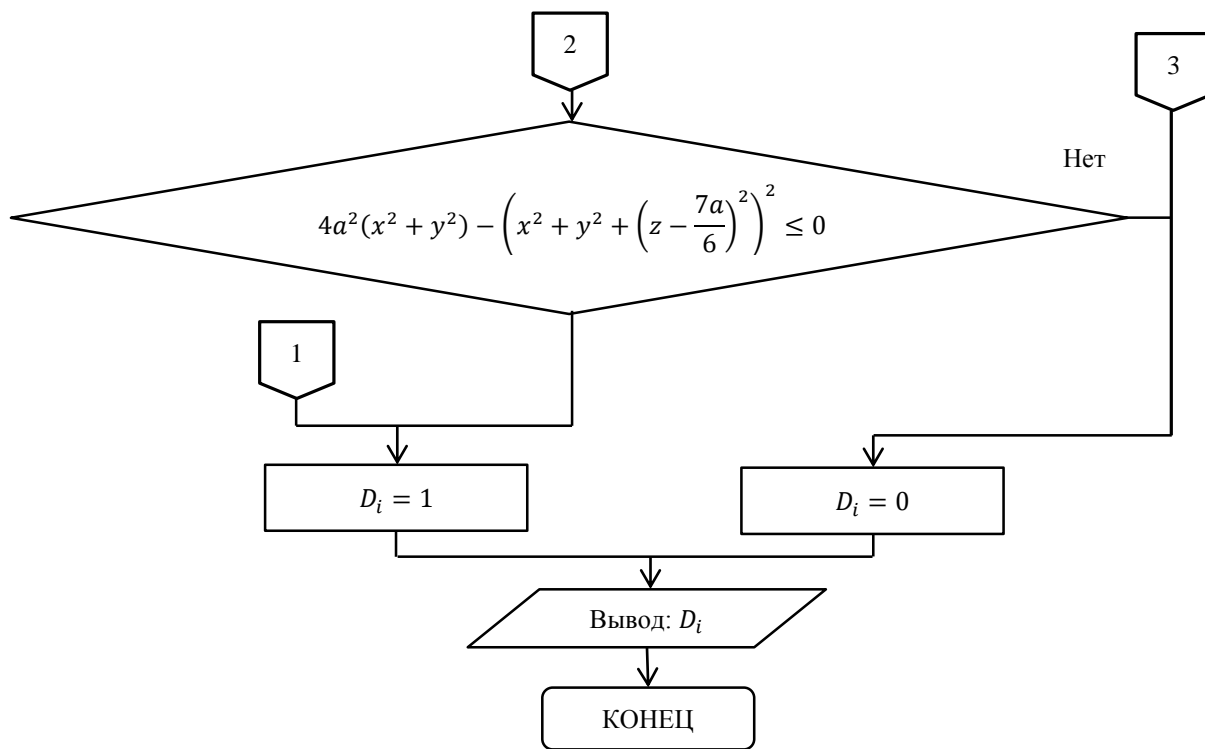
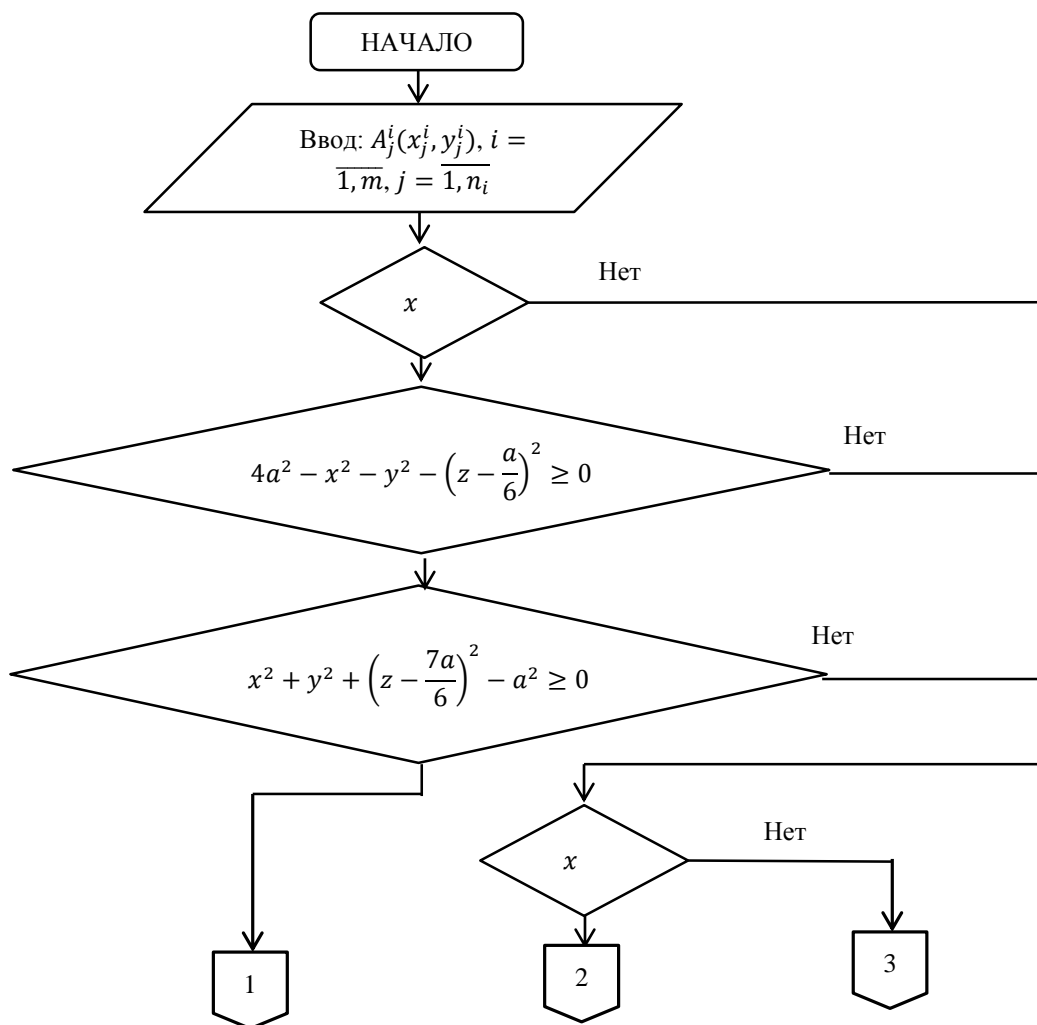


Рисунок П2.12. – Блок-схема процедуры РП – 12.



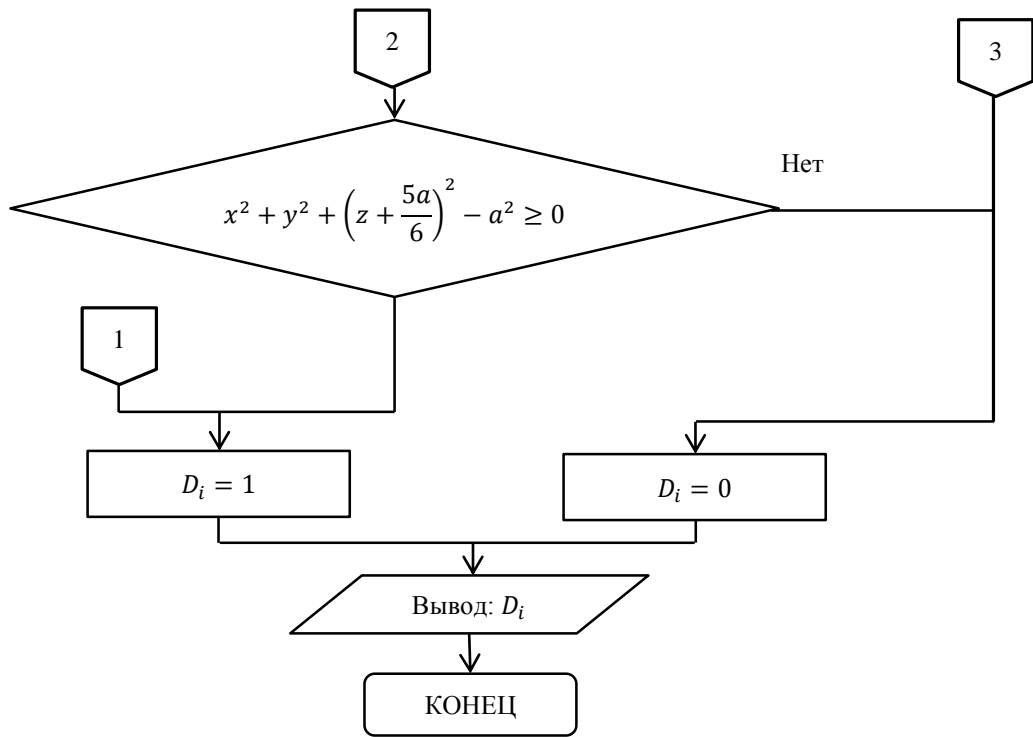
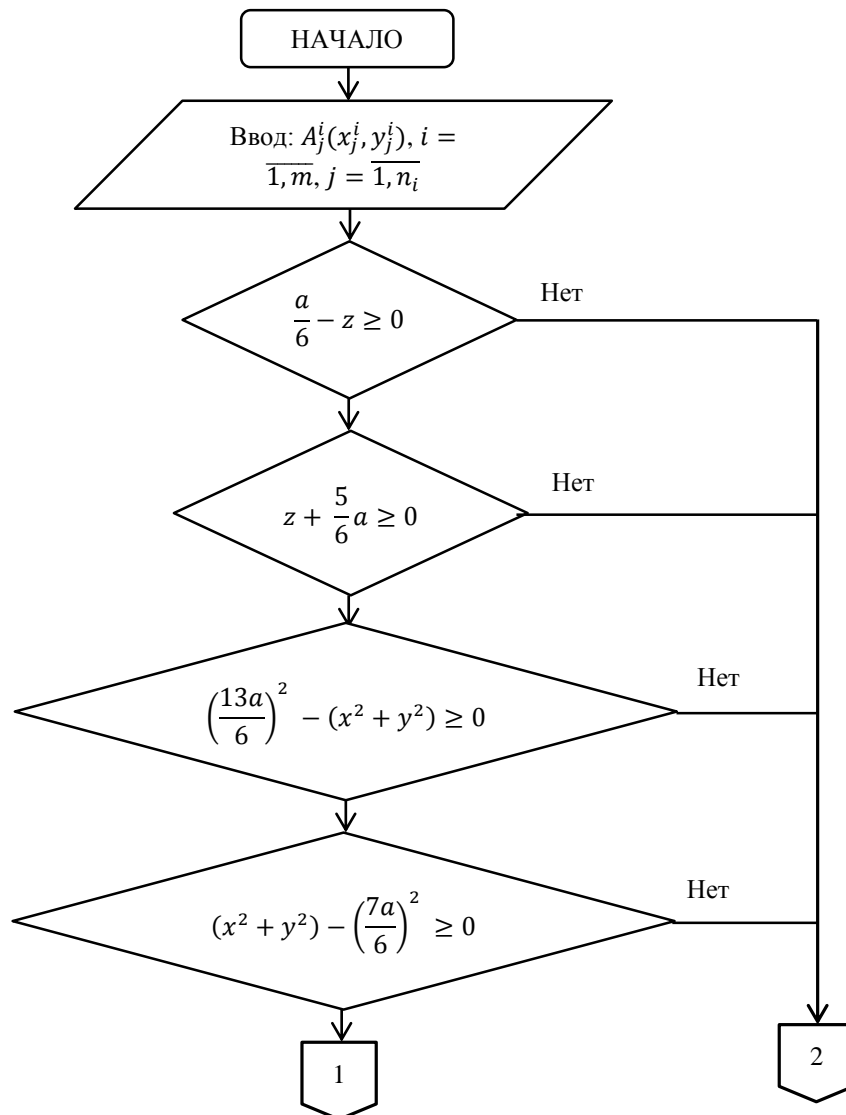


Рисунок П2.13. – Блок-схема процедуры РП – 13.



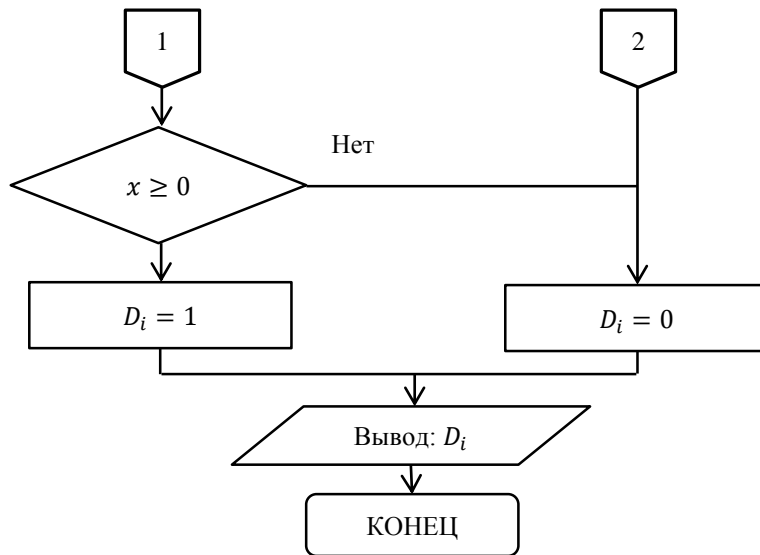
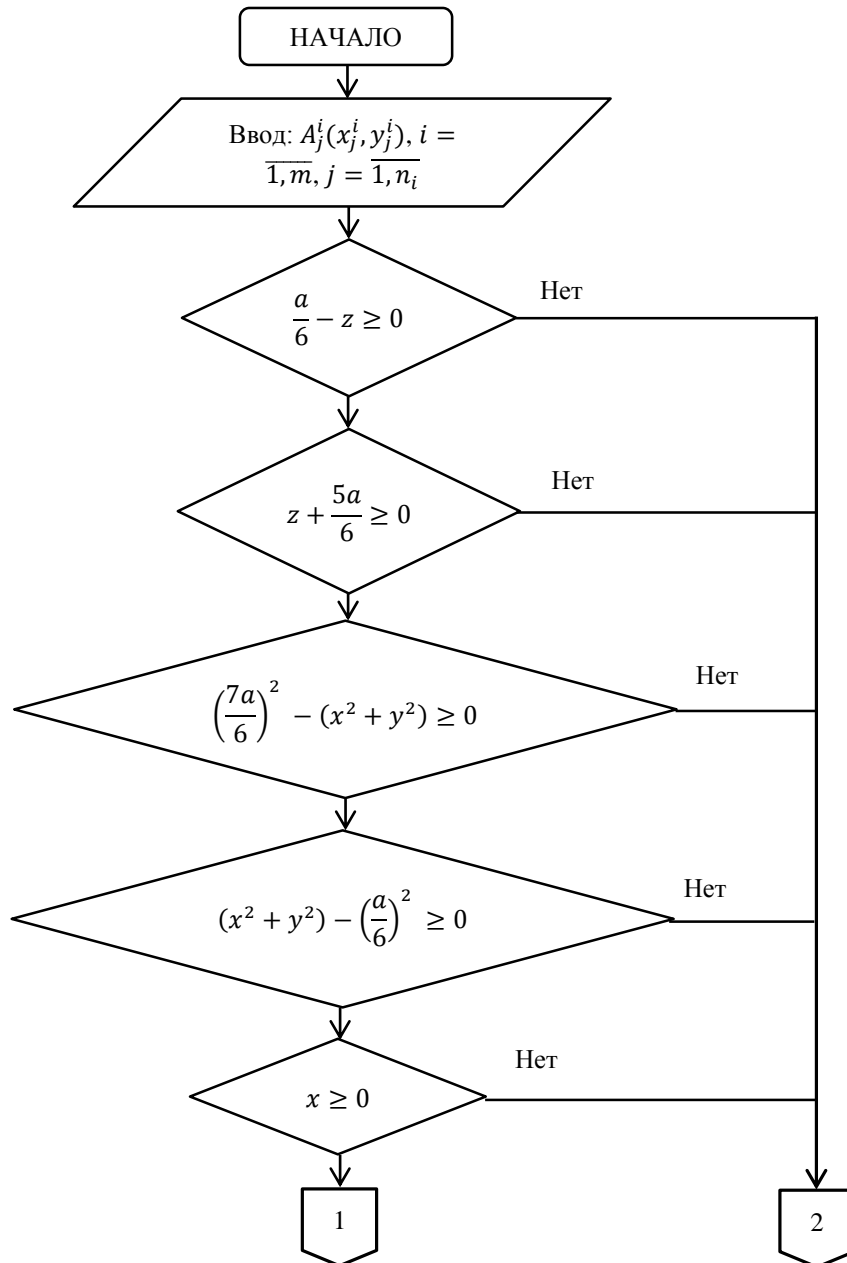


Рисунок П2.14. – Блок-схема процедуры РП – 14.



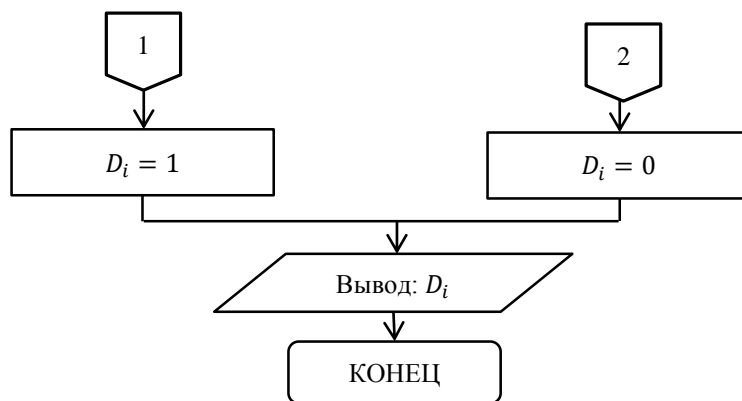


Рисунок П2.15. – Блок-схема процедуры РП – 15.

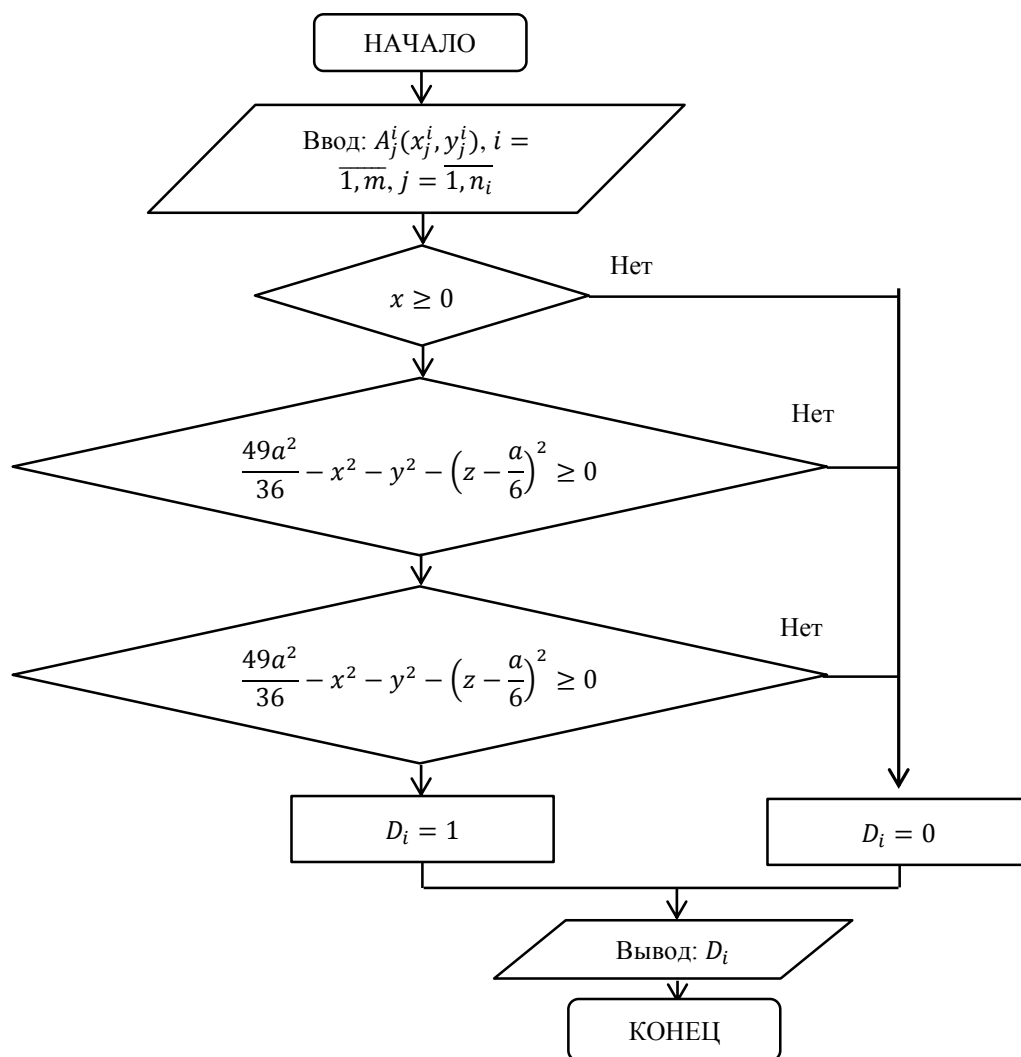


Рисунок П2.16. – Блок-схема процедуры РП – 16.

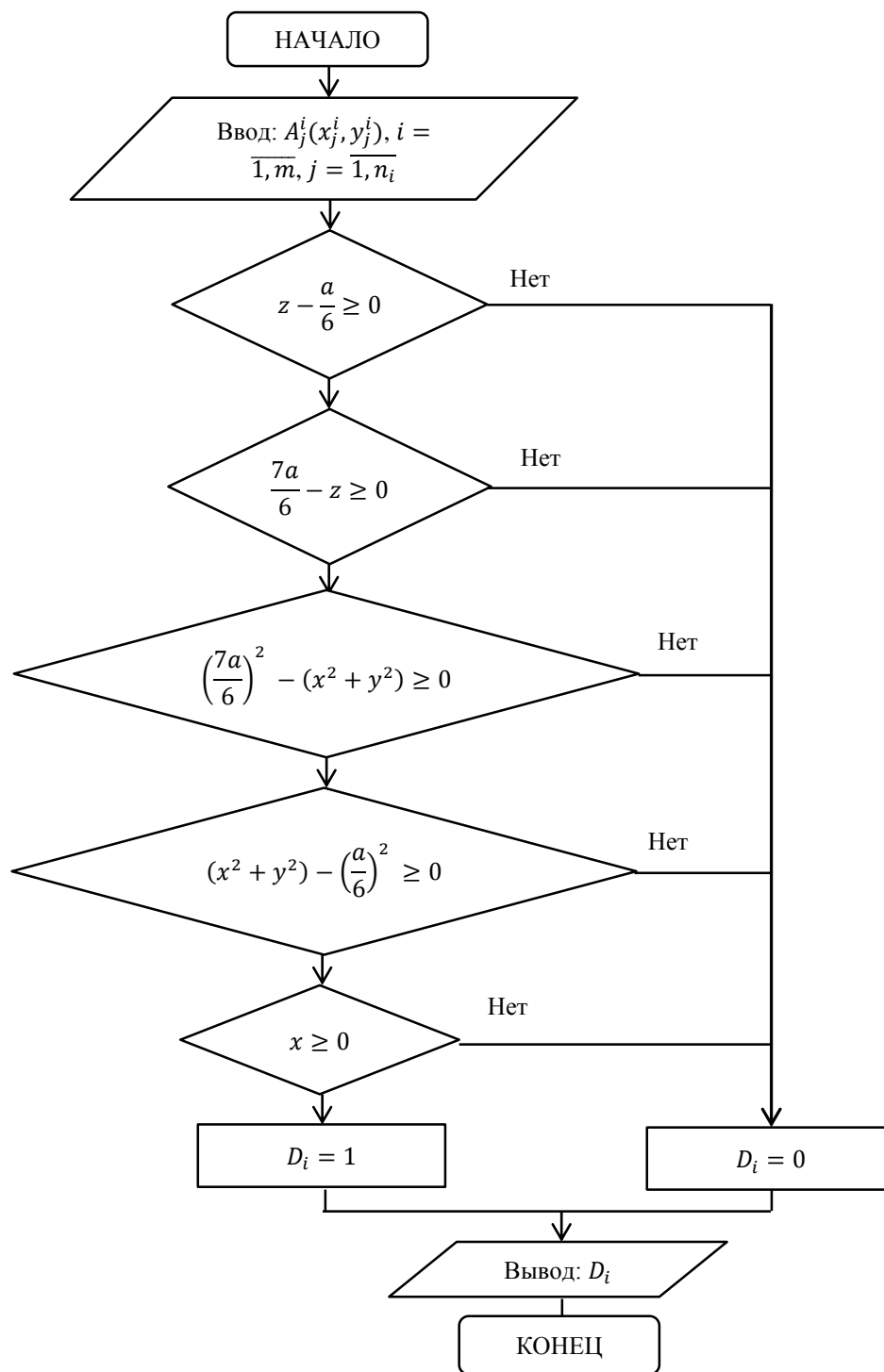


Рисунок П2.17. – Блок-схема процедуры РП – 17.

Приложение 3 – Листинг основного модуля программы

```
unit f_Main;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ActnList, ImgList, TB2Item, TBX, TB2Dock,
  TB2Toolbar,
  IniFiles, utils, ksUtils, ksVCL, mxFlatControls, dxPageControl,
  TBXExtItems, RVScroll, RichView, ksInfoLabel, ExtCtrls;

type
  TfMain = class(TForm)
    TBXDock1: TTBXDock;
    tbmenu: TTBXToolbar;
    TBXSubmenuItem1: TTBXSubmenuItem;
    TBXSeparatorItem5: TTBXSeparatorItem;
    TBControlItem1: TTBControlItem;
    tbingMenu: TTBXToolbar;
    TBXItem8: TTBXItem;
    TBXSeparatorItem4: TTBXSeparatorItem;
    TBXItem9: TTBXItem;
    TBXSeparatorItem3: TTBXSeparatorItem;
    TBXItem5: TTBXItem;
    Img16: TImageList;
    ActionList1: TActionList;
    cmEditSet: TAction;
    cmCalc: TAction;
    cmClose: TAction;
    TBXItem1: TTBXItem;
    TBXItem2: TTBXItem;
    TBSeparatorItem1: TTBSeparatorItem;
    TBSeparatorItem2: TTBSeparatorItem;
    TBXItem3: TTBXItem;
    cmEditRobots: TAction;
    TBXItem4: TTBXItem;
    TBXItem6: TTBXItem;
    TBXSubmenuItem2: TTBXSubmenuItem;
    mnitPolygon: TTBXItem;
    mnitCycle: TTBXItem;
    Panel1: TPanel;
    Panel2: TPanel;
    pgAll: TdxPageControl;
```



```

dxTabSheet1: TdxTabSheet;
pgCtl: TdxPageControl;
tsGraphcycle: TdxTabSheet;
dxTabSheet4: TdxTabSheet;
mmData: TMemmo;
dxTabSheet2: TdxTabSheet;
Label1: TLabel;
lbInfo: TLabel;
pgCtlPolygon: TdxPageControl;
dxTabSheet5: TdxTabSheet;
dxTabSheet6: TdxTabSheet;
Memo1: TMemmo;
Button1: TButton;
procedure cmCloseExecute(Sender: TObject);
procedure cmEditSetExecute(Sender: TObject);
procedure FormShow(Sender: TObject);
procedure FormDestroy(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure cmEditRobotsExecute(Sender: TObject);
procedure mmitCycleClick(Sender: TObject);
procedure mmitPolygonClick(Sender: TObject);
procedure cmCalcExecute(Sender: TObject);
private
  setIni: TIniFile;
  iter:integer;
  delta:double;
  iterP:integer;
  deltaP:double;
  robots:robot;
  robotsP:robot;
  cntDevice:Integer;
  cntDeviceP:Integer;
  devices: Array of device;
  devicesP: Array of device;
  points:array of array of point;
  pointsP:array of array of point;
  procedure fillDevice;
  procedure fillDeviceP;
  procedure FillREsultGRaph();
  procedure fillResultVal(f:double);
  procedure calcCycle;
  procedure calcPolygon;
public
  { Public declarations }
end;

```

```

var
  fMain: TfMain;

implementation

uses f_SetingsRobots, f_EditSettings, Math, f_settingsRobotsPolygon,
  f_EditSettingsPolygon;

{$R *.dfm}

procedure TfMain.FormShow(Sender: TObject);
begin
  pgAll.ActivePageIndex:=0;
  lbInfo.Caption:='Цилиндр';
  setIni:=TIniFile.Create(ExtractFilePath(Application.ExeName)
+'settings.ini');
  iter:=StrToIntDef(setIni.ReadString('DefVal','iter','10'),10);

  delta:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('DefVal','delta','0.
2')));
  iterP:=StrToIntDef(setIni.ReadString('DefVal','iterP','10'),10);

  deltaP:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('DefVal','deltaP'
,'0.2')));

  robots.coordX:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robots'
,'coordX','0.6')));

  robots.coordY:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robots'
,'coordY','1.2')));

  robots.radius:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robots','
radius','0.5')));

  robots.r_in:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robots','ri
n','0.6')));

  robots.r_out:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robots','r
out','1.2')));

  robots.h_low:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robots','

```

```

hlow','0.5')));

robots.h_high:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robots',
'hhigh','1.0')));

robots.alfa:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robots','ral
fa','135')));

robots.beta:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robots','rb
eta','225')));

robotsP.coordX:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robot
sP','coordX','0.6')));

robotsP.coordY:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robot
sP','coordY','1.2')));
    robotsP.cntpoint:=StrToIntDef(setIni.ReadString('RobotsP','cntPoint','5'),5);

robotsP.points:=StrToPoint(setIni.ReadString('RobotsP','points','0.5;1'),robotsP.cnt
point);

robotsP.r_in:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('RobotsP',
'rin','0.6')));

robotsP.r_out:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('RobotsP',
'rout','1.2')));

robotsP.h_low:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robots
P','hlow','0.5')));

robotsP.h_high:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('Robot
sP','hhigh','1.0')));

robotsP.alfa:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('RobotsP',
'ralfa','135')));

robotsP.beta:=StrToFloatDef(CheckDecimalSeparator(setIni.ReadString('RobotsP',
'rbeta','225')));

    fillDevice;
    fillDeviceP;

end;

```

```

procedure TfMain.cmEditSetExecute(Sender: TObject);
var
  f:TfEditSetings;
  fp:TfEditSettingsPolygon;
begin
  if mnitCycle.Checked then
  begin
    f := TfEditSetings.Create(Application);
    try
      if f.ShowModal=mrOk then
      begin
        fillDevice;
      end;
    finally
      f.Free;
    end;
  end
  else
  begin
    fp := TfEditSettingsPolygon.Create(Application);
    try
      if fp.ShowModal=mrOk then
      begin
        fillDeviceP;
      end;
    finally
      fp.Free;
    end;
  end;

end;

procedure TfMain.cmCloseExecute(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;

procedure TfMain.FormDestroy(Sender: TObject);
begin
  setini.Free;
end;

procedure TfMain.Button1Click(Sender: TObject);
var
  dc:HDC;

```

```

S:String;
pts:TArrPoint;
a,b,c,d:point;
intersect:boolean;
begin
// devices[cntDevice].coordX:=5.0;
// Msg('Length point:'+intToStr(Length(points)));
// Msg('Length points[0]:'+IntToStr(Length(points[0])));
dc:=GetDC(tsGraphcycle.Handle);
Rectangle(dc,1,1,10,15);
ReleaseDC(tsGraphcycle.Handle,dc);
deleteDC(dc);
{
S:='1.2;2.3;3.4;1.4;2.7;3.4';
pts:=StrToPoint(s,3);

s:=PointToStr(pts,3);
Msg(S);
}
a.coordX:=1.1;
a.coordY:=1.1;
b.coordX:=2.1;
b.coordY:=2.1;
c.coordX:=3.1;
c.coordY:=3.1;
d.coordX:=4.1;
d.coordY:=4.1;
intersect:= intersection(a,b,c,d);
if intersect then
  msg('Пересекаются')
else
  msg('Не пересекаются');
a.coordX:=1.1;
a.coordY:=1.1;
b.coordX:=1.1;
b.coordY:=2.1;
c.coordX:=3.1;
c.coordY:=3.1;
d.coordX:=3.1;
d.coordY:=4.1;
intersect:= intersection(a,b,c,d);
if intersect then
  msg('Пересекаются')
else
  msg('Не пересекаются');

```

```

a.coordX:=1.1;
a.coordY:=1.1;
b.coordX:=1.1;
b.coordY:=2.1;
c.coordX:=1.1;
c.coordY:=1.8;
d.coordX:=3.1;
d.coordY:=4.1;
intersect:= intersection(a,b,c,d);
if intersect then
  msg('Пересекаются')
else
  msg('Не пересекаются');

end;

procedure TfMain.cmEditRobotsExecute(Sender: TObject);
var
  f:TfSetingsRobots;
  fp:TfsettingsRobotsPolygon;
begin
  if mnitCycle.Checked then
    begin
      f := TfSetingsRobots.Create(Application);
      try
        f.edIter.Value:=iter;
        f.edDelta.Value:=delta;
        f.fledCoordX.Value:=robots.coordX;
        f.fledCoordY.Value:=robots.coordY;
        f.fledRadius.Value:=robots.radius;
        f.fledRin.Value:=robots.r_in;
        f.fledRout.Value:=robots.r_out;
        f.fledHlow.Value:=robots.h_low;
        f.fledHhigh.Value:=robots.h_high;
        f.fledAlfa.Value:=robots.alfa;
        f.fledBeta.Value:=robots.beta;
        // i:=f.ShowModal;
        if f.ShowModal=mrOk then
          begin
            iter:=StrToInt(f.edIter.Text);
            delta:=f.edDelta.Value;
            robots.coordX:=f.fledCoordX.Value;
            robots.coordY:=f.fledCoordY.Value;
            robots.radius:=f.fledRadius.Value;
            robots.r_in:=f.fledRin.Value;

```

```

    robots.r_out:=f.fledRout.Value;
    robots.h_low:=f.fledHlow.Value;
    robots.h_high:=f.fledHhigh.Value;
    robots.alfa:=f.fledAlfa.Value;
    robots.beta:=f.fledBeta.Value;
end;
finally
    f.Free;
end;
end
else
begin
    fp := TfsettingsRobotsPolygon.Create(Application);
    try
        fp.edIter.Value:=iterP;
        fp.edDelta.Value:=deltaP;
        fp.fledCoordX.Value:=robotsp.coordX;
        fp.fledCoordY.Value:=robotsp.coordY;
        fp.flspedPoint.Value:=robotsP.cntpoint;
        fp.edPoints.Text:=PointToStr(robotsP.points,robotsP.cntpoint);
        fp.fledRin.Value:=robotsP.r_in;
        fp.fledRout.Value:=robotsP.r_out;
        fp.fledHlow.Value:=robotsP.h_low;
        fp.fledHhigh.Value:=robotsP.h_high;
        fp.fledAlfa.Value:=robotsP.alfa;
        fp.fledBeta.Value:=robotsP.beta;
// i:=f.ShowModal;
if fp.ShowModal=mrOk then
begin
    iterP:=StrToInt(fp.edIter.Text);
    deltaP:=fp.edDelta.Value;
    robotsp.coordX:=fp.fledCoordX.Value;
    robotsp.coordY:=fp.fledCoordY.Value;
    robotsp.cntpoint:=StrToInt(fp.flspedPoint.Text);
    robotsp.points:=StrToPoint(fp.edPoints.Text,robotsP.cntpoint);
    robotsp.r_in:=fp.fledRin.Value;
    robotsp.r_out:=fp.fledRout.Value;
    robotsp.h_low:=fp.fledHlow.Value;
    robotsp.h_high:=fp.fledHhigh.Value;
    robotsp.alfa:=fp.fledAlfa.Value;
    robotsp.beta:=fp.fledBeta.Value;
end;
finally
    fp.Free;
end;

```

```

end;
end;

procedure TfMain.fillDevice;
var
  i, j, cntp:Integer;
  curDevice, curPoint, curStr:String;
begin
  cntDevice:=setini.ReadInteger('defVal','cntDevice',3);
  setLength(devices,cntDevice);
  SetLength(points,cntDevice);
  cntp:=1;
  for i :=0 to cntDevice-1 do
  begin
    curDevice:=setIni.ReadString('Devices','dev'+IntToStr(i+1),'nn');
    // Msg(curDevice);
    if curDevice<>'nn' then
    begin
      curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curDevice,1,[':']));
      devices[i].coordX:=StrToFloatDef(curStr,0);
      curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curDevice,2,[':']));
      devices[i].coordY:=StrToFloatDef(curStr,0);
      curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curDevice,3,[':']));
      devices[i].radius:=StrToFloatDef(curStr,0);
      j:=1;
      cntp:=1;
      while (setIni.ReadString('Points','point'+IntToStr(j),'nn')<>'nn') do
      begin
        curPoint:=setIni.ReadString('Points','point'+IntToStr(j),'nn');
        curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curPoint,1,[':']));
        if (StrToInt(curStr)=i+1) then
        begin
          SetLength(points[i],cntp);
          curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curPoint,2,[':']));
          points[i,cntp-1].coordX:=StrToFloatDef(curStr,0);
          curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curPoint,3,[':']));
          points[i,cntp-1].coordY:=StrToFloatDef(curStr,0);
          curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curPoint,4,[':']));
          points[i,cntp-1].coordZ:=StrToFloatDef(curStr,0);
          inc(cntp);
        end;
        inc(j);
      end;
    end;
  end;
end;
end;

```



```

end;

procedure TfMain.FillREsultGRaph;
begin
//
end;

procedure TfMain.fillResultVal(f:double);
var
  i,j:integer;
begin
  mmData.Clear;
  mmData.Lines.Add('F='+FloatToStr(f));
  mmData.Lines.Add('Устройства:');
  for i :=0 to cntDevice-1 do
  begin
    mmData.Lines.Add('Устройство'+IntToStr(i+1)+'':
x='+FloatToStrF(devices[i].coordX,ffFixed,5,2)+
      ' y=' +FloatToStrF(devices[i].coordY,ffFixed,5,2)+
      ' Радиус='+FloatToStrF(devices[i].radius,ffFixed,5,2));
    mmData.Lines.Add('Точки позиционирования:');
    for j :=0 to Length(points[i])-1 do
    begin
      mmData.Lines.Add(IntToStr(j+1)+'':
x='+FloatToStrF(points[i,j].coordX,ffFixed,5,2)+
      ' y=' +FloatToStrF(points[i,j].coordY,ffFixed,5,2)+
      ' z='+FloatToStrF(points[i,j].coordZ,ffFixed,5,2));
    end;
  end;

end;

end;

end;

procedure TfMain.mnitCycleClick(Sender: TObject);
begin
  mnitCycle.Checked:=not mnitCycle.Checked;
  mnitPolygon.Checked:=not mnitPolygon.Checked;
  if mnitCycle.Checked then
  begin
    pgAll.ActivePageIndex:=0;
    lbInfo.Caption:='Цилиндр';
  end
  else
  begin

```

```

    pgAll.ActivePageIndex:=1;
    lbInfo.Caption:='Многоугольник';
end;
end;

procedure TfMain.mnitPolygonClick(Sender: TObject);
begin
    mnitCycle.Checked:=not mnitCycle.Checked;
    mnitPolygon.Checked:=not mnitPolygon.Checked;
    if mnitCycle.Checked then
    begin
        pgAll.ActivePageIndex:=0;
        lbInfo.Caption:='Цилиндр';
    end
    else
    begin
        pgAll.ActivePageIndex:=1;
        lbInfo.Caption:='Многоугольник';
    end;
end;

end;

procedure TfMain.fillDeviceP;
var
    i, j, cntp:Integer;
    curDevice, curPoint, curStr:String;
begin
    cntDeviceP:=setIni.ReadInteger('defVal','cntDeviceP',3);
    setLength(devicesP,cntDeviceP);
    SetLength(pointsP,cntDeviceP);
    cntp:=1;
    for i :=0 to cntDeviceP-1 do
    begin
        curDevice:=setIni.ReadString('DevicesP','dev'+IntToStr(i+1),'nn');
        // Msg(curDevice);
        if curDevice<>'nn' then
        begin
            curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curDevice,1,[':']));
            devices[i].coordX:=StrToFloatDef(curStr,0);
            curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curDevice,2,[':']));
            devices[i].coordY:=StrToFloatDef(curStr,0);
            curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curDevice,3,[':']));
            devices[i].cntPoint:=StrToIntDef(curStr,0);

            curPoint:=setIni.ReadString('DevicesP','points'+IntToStr(i+1),'nn');

```

```

devices[i].points:=StrToPoint(curPoint,devices[i].cntPoint);
j:=1;
cntp:=1;
while (setIni.ReadString('PointsP','point'+IntToStr(j),'nn')<>'nn') do
begin
  curPoint:=setIni.ReadString('PointsP','point'+IntToStr(j),'nn');
  curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curPoint,1,[':']));
  if (StrToInt(curStr)=i+1) then
  begin
    SetLength(points[i],cntp);
    curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curPoint,2,[':']));
    points[i,cntp-1].coordX:=StrToFloatDef(curStr,0);
    curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curPoint,3,[':']));
    points[i,cntp-1].coordY:=StrToFloatDef(curStr,0);
    curStr:= CheckDecimalSeparator(ExWord(curPoint,4,[':']));
    points[i,cntp-1].coordZ:=StrToFloatDef(curStr,0);
    inc(cntp);
  end;
  inc(j);
end;
end;
end;

end;

procedure TfMain.calcCycle;
var
  f,f1, {delta,} fi:array of Double;
  i,j,k:integer;
  isCalc, isStep6:Boolean;
  cntIter:integer;
begin
  Wait('Идет расчет');
  if mnitCycle.Checked then
  begin
    cntiter:=0;
    SetLength(fi,cntDevice);
    isCalc:=true;
    // isCalc:=false;
    //delta:=0;
    f1:=0;
    for i :=0 to cntDevice-1 do
    begin
      devices[i].coordX:=devices[i].coordX-robots.coordX;

```

```

    devices[i].coordY:=devices[i].coordY-robots.coordY;
//  delta:=delta+devices[i].radius;
    f1:=f1+sqr(devices[i].coordX)+sqr(devices[i].coordY);
    for j :=0 to Length(points[i])-1 do
    begin
        points[i,j].coordX:= points[i,j].coordX- robots.coordX;
        points[i,j].coordY:= points[i,j].coordY- robots.coordY;
    end;

end;
f:=f1;
// delta:=delta/(cntDevice*cntDevice);
while isCalc do
begin
    WaitInc();
    inc(cntIter);
    if cntIter>iter then
    begin
        isCalc:=false;
        continue;
    end;
// step3
    fi:=0;
    for i := 0 to cntDevice-1 do
    begin
        fi[i]:=ArcTan2(devices[i].coordY, devices[i].coordX);
        fi:=fi+fi[i]/cntDevice;
    end;
// step4
    for i := 0 to cntDevice-1 do
    begin
        devices[i].coordX:=devices[i].coordX-delta*Cos(fi);
        devices[i].coordY:=devices[i].coordY-delta*Sin(fi);
        for j :=0 to Length(points[i])-1 do
        begin
            points[i,j].coordX:= points[i,j].coordX- delta*Cos(fi);
            points[i,j].coordY:= points[i,j].coordY- delta*Sin(fi);
        end;
    end;
//step5
    k:=1;
    for i := 0 to cntDevice-1 do
    begin
        tmp:=sqr(devices[i].coordX)+sqr(devices[i].coordY)-devices[i].radius-
robots.radius;

```

```

    if tmp>=0 then
        break
    else
        inc(k);
    end;
    if k=cntDevice then
    begin
        isCalc:=false;
        Continue;
    end;
    //step6
    isStep6:=true;
    for i := 0 to cntDevice-1 do
    begin
        if isStep6 then
        for j :=0 to Length(points[i])-1 do
        begin
            if isStep6 then
            begin
                isstep6:=(D1(robots.r_out,points[i,j].coordX,points[i,j].coordY)and
D2(robots.r_in,points[i,j].coordX,points[i,j].coordY))
                    and (D3(robots.h_high,points[i,j].coordZ) and
D4(robots.h_low,points[i,j].coordZ)
                    and (D5(robots.alfa, points[i,j].coordX,points[i,j].coordY) and
D6(robots.beta, points[i,j].coordX,points[i,j].coordY))
                end;
            end;
        end;
        if not isStep6 then continue;
        // step 7
        f1:=0;
        for i := 0 to cntDevice-1 do
        begin
            f1:=f1+sqr(devices[i].coordX)+sqr(devices[i].coordY);
        end;
        // step8
        if f1<f then f:=f1;
    end;

    FillREsultGRaph;
    fillResultVal(f);
    end;
    WaitStopAll;
end;

```

```

procedure TfMain.calcPolygon;
var
  f,f1, {delta,} fi,all, tmp:Double;
  i,j,k:integer;
  fi:array of Double;
  isCalc, isStep6:Boolean;
  cntIter:integer;
begin
  Wait('Идет расчет');
  if mnitPolygon.Checked then
  begin
    cntiter:=0;
    SetLength(fi,cntDeviceP);
    isCalc:=true;
  // isCalc:=false;
  //delta:=0;
  f1:=0;
  for i :=0 to cntDeviceP-1 do
  begin
    devicesP[i].coordX:=devicesP[i].coordX-robotsP.coordX;
    devicesP[i].coordY:=devicesP[i].coordY-robotsP.coordY;
  // delta:=delta+devices[i].radius;
    f1:=f1+sqr(devicesP[i].coordX)+sqr(devicesP[i].coordY);
    for j :=0 to Length(points[i])-1 do
    begin
      pointsP[i,j].coordX:= pointsP[i,j].coordX- robotsP.coordX;
      pointsP[i,j].coordY:= pointsP[i,j].coordY- robotsP.coordY;
    end;

  end;

  f:=f1;
  // delta:=delta/(cntDevice*cntDevice);
  while isCalc do
  begin
    WaitInc();
    inc(cntIter);
    if cntIter>iterP then
    begin
      isCalc:=false;
      continue;
    end;
  // step3
  fi,all:=0;
  for i := 0 to cntDeviceP-1 do
  begin

```

```

    fi[i]:=ArcTan2(devicesP[i].coordY, devicesP[i].coordX);
    fiall:=fiall+fi[i]/cntDeviceP;
end;
// step4
for i := 0 to cntDeviceP-1 do
begin
    devicesP[i].coordX:=devicesP[i].coordX-deltaP*Cos(fiall);
    devicesP[i].coordY:=devicesP[i].coordY-deltaP*Sin(fiall);
    for j :=0 to Length(pointsP[i])-1 do
    begin
        pointsP[i,j].coordX:= pointsP[i,j].coordX- deltaP*Cos(fiall);
        pointsP[i,j].coordY:= pointsP[i,j].coordY- deltaP*Sin(fiall);
    end;
end;
//step5
k:=1;
for i := 0 to cntDeviceP-1 do
begin
    tmp:=sqr(devicesP[i].coordX)+sqr(devicesP[i].coordY)-
devicesP[i].radius-robotsP.radius;
    if tmp>=0 then
        break
    else
        inc(k);
    end;
if k=cntDeviceP then
begin
    isCalc:=false;
    Continue;
end;
//step6
isStep6:=true;
for i := 0 to cntDeviceP-1 do
begin
    if isStep6 then
        for j :=0 to Length(pointsP[i])-1 do
        begin
            if isStep6 then
                begin
                    isstep6:=(D1(robotsP.r_out,pointsP[i,j].coordX,pointsP[i,j].coordY)and
D2(robotsP.r_in,pointsP[i,j].coordX,pointsP[i,j].coordY))
                        and (D3(robotsP.h_high,pointsP[i,j].coordZ) and
D4(robotsP.h_low,pointsP[i,j].coordZ))
                        and (D5(robotsP.alfa, pointsP[i,j].coordX,pointsP[i,j].coordY)

```


```

and D6(robotsP.beta, pointsP[i,j].coordX,pointsP[i,j].coordY))
    end;
    end;
end;
if not isStep6 then continue;
// step 7
f1:=0;
for i := 0 to cntDeviceP-1 do
begin
    f1:=f1+sqr(devicesP[i].coordX)+sqr(devicesP[i].coordY);
end;
// step8
if f1<f then f:=f1;
end;

FillREsultGRaph;
fillResultVal(f);
end;
WaitStopAll;
end;

procedure TfMain.cmCalcExecute(Sender: TObject);
begin
if mnitCycle.Checked then
begin
    calcCycle;
end
else
begin
    calcPolygon;
end;

end;

«Добавить точку привязки» 
end.

```