

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

На правах рукописи



ШАРОНИН КИРИЛЛ АНАТОЛЬЕВИЧ

**АЛГОРИТМЫ И КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ПОСТРОЕНИЯ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОМПОНОВКИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., доцент, профессор кафедры «АПТО»

Егоров С.Я.

Тамбов – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Обзор существующих разработок по математическому моделированию компоновки промышленных объектов.....	9
1.1 Анализ задач компоновки.....	12
1.2 Постановка задачи компоновки.....	19
1.3 Подходы к решению задачи.....	26
1.4 Обзор программных продуктов по компоновке промышленных объектов.....	30
1.5 Заключение и направление исследования.....	34
Глава 2 Математическая модель компоновки.....	36
2.1 Математическое моделирование структуры технической системы.....	37
2.2 Система ограничений математической.....	45
2.3 Классификация правил компоновки.....	48
2.4 Выбор критерия оптимальной компоновки.....	51
2.5 Обобщенная математическая постановка задачи.....	55
Глава 3 Метод формирования и контроля ограничений.....	57
3.1 Процедура задания ограничений.....	58
3.2 Процедура контроля ограничений.....	62
3.3 Процедура получения начального допустимого варианта размещения.....	66
3.4 Методика решения задач компоновки.....	69
Глава 4 Комплекс программ по компоновке промышленных объектов....	76
4.1 Структура программного комплекса.....	77
4.2 Структура экспертной системы.....	87
4.3 Пример реализации предложенного подхода.....	90
Заключение.....	104
Список использованных источников.....	106

Приложение А Справка о внедрении на предприятии.....	118
Приложение Б Справка о внедрении на предприятии.....	119
Приложение В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Необходимым условием развития экономики страны является качественное развитие промышленных объектов. В современных условиях проектирование промышленных объектов должно обеспечивать получение оптимальных проектных решений по ряду критериев. От оптимальности принятых проектных решений зависит эффект от внедрения промышленного объекта. Одним из основных этапов в конструкторском проектировании является этап топологического синтеза, заключающийся в получении пространственной модели проектируемого объекта. Пространственная модель будущего промышленного объекта включает строительные конструкции, размещенное оборудование, сеть технологических соединений, вспомогательное оборудование и металлоконструкции. От полученного на этом этапе решения зависит стоимость реализации объекта. Также, проектное решение на этом этапе существенно влияет на стоимость эксплуатации. При этом решение должно удовлетворять ограничениям, вытекающим из нормативных документов (СНиП, ПБ, ГОСТ и т.д.). Выбор ограничений зависит от технологических особенностей, условий эксплуатации проектируемых объектов, условий работы оборудования, персонала, условий обслуживания и других факторов. К тому же, при наличии опыта, проектировщик может сам накладывать дополнительные ограничения на получаемое решение.

Математические модели и методы решения задачи компоновки описаны в работах отечественных авторов В.В. Кафарова, Е.Н. Малыгина, В.П. Мешалкина, И.П. Норенкова, И.Д. Зайцева, В.М. Курейчика, С.Я. Егорова и зарубежных авторов Т. Hamann, Т.С. Koopmans, M.Beckmann, A.R. McKendall, R.D. Meller, J.A. Tompkins. Предложенные ими модели рассматривают решение широкого круга задач компоновки. Однако, добавление новых ограничений в эти модели связано со значительными трудностями. Таким образом, для автоматизированного решения задач, требующих учета дополнительных ограничений, необходима

разработка новых моделей и программных комплексов, либо трудоемкая модернизация существующих.

Исходя из этого разработка алгоритмов формирования и учета ограничений в задачах компоновки промышленных объектов и их реализация в виде комплекса программ, позволяющего осуществлять постановку и решение класса задач компоновки промышленных объектов, является актуальной научной и практической задачей.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009-2013 годы», государственный контракт №02.740.11.0624.

Цель и задачи диссертационного исследования.

Целью диссертационного исследования является уменьшение времени получения проектных решений с использованием комплекса программ построения математической модели компоновки промышленных объектов, основанного на методах и алгоритмах автоматизированного формирования ограничений модели и их учета при решении задач компоновки.

В соответствии с целью работы сформулированы основные решаемые в ней задачи:

1. Выполнить анализ существующих отечественных и зарубежных работ в области компоновки промышленных объектов.

2. Разработать подход к математическому моделированию компоновки промышленных объектов, позволяющий получать математическую модель компоновки для различных классов промышленных объектов на основе обобщенной структуры модели.

3. Разработать обобщенную структуру математической модели компоновки, включающую модель структуры технической системы и способ задания ограничений на основе экспертной информации.

4. Разработать метод формирования и контроля ограничений математической модели.

5. Модифицировать методику решения задачи компоновки промышленных объектов.

6. Реализовать разработанный подход в виде комплекса программ автоматизированного построения математической модели компоновки промышленных объектов.

Предмет и объект диссертационного исследования.

Объектом диссертационного исследования являются процедуры принятия проектных решений по компоновке промышленных объектов машиностроительного и химического профиля.

Предметом исследования являются математические модели компоновки промышленных объектов, ограничения и методы их учета при решении задач.

Методы диссертационного исследования.

В работе использованы методы математического моделирования, элементы математической логики, теории графов, искусственного интеллекта, в частности экспертных систем.

Научная новизна диссертационного исследования.

Элементы научной новизны содержат следующие результаты исследования:

1. Разработан новый подход к математическому моделированию компоновки промышленных объектов, отличающийся построением математической модели для конкретной постановки задачи на основе обобщенной структуры модели.

2. Разработана обобщенная структура математической модели компоновки промышленных объектов, основанная на применении N -ориентированных гиперграфов для моделирования технической системы, отличающаяся записью ограничений в виде продукционных правил.

3. Впервые разработан метод формирования и контроля ограничений математической модели компоновки, отличающийся возможностью добавления новых ограничений и их учета в процессе решения задач компоновки без изменения программного кода.

4. Модифицирована методика решения задачи компоновки с использованием разработанной структуры модели и метода формирования и контроля ограничений.

5. Предложена структура комплекса программ построения математической модели компоновки промышленных объектов, отличающаяся применением экспертной системы для контроля ограничений при компоновке.

Практическая ценность диссертационного исследования.

Практическую значимость представляет разработанный комплекс прикладных программ для ЭВМ, реализующий предложенный метод формирования и контроля ограничений при компоновке промышленных объектов, дающий возможность в автоматизированном режиме осуществлять постановку задачи компоновки.

На защиту выносятся:

1. Новый подход к математическому моделированию компоновки промышленных объектов различного рода на основе обобщенной структуры математической модели.

2. Обобщенная структура математической модели компоновки промышленных объектов, основанная на применении N-ориентированных гиперграфов с ограничениями на свойства вершин и ребер.

3. Метод формирования и контроля ограничений математической модели, включающий:

– процедуру формирования системы ограничений математической модели в виде правил, позволяющую формализовать ограничения для применения в экспертной системе;

– процедуру контроля выполнения ограничений с применением механизмов экспертных систем.

4. Модифицированная методика решения задачи компоновки.

5. Структура системы автоматизированного проектирования компоновки промышленных объектов.

Область исследований.

Результаты диссертационного исследования соответствуют пунктам 1, 4, 8 паспорта специальности научных работников.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 2-ая научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых.(Тамбов 2010); Всероссийская конференция с международным участием «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации» (Москва 2011); Выставка информационных и коммуникационных технологий «Softool-2011»; XXIV-XXVI Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (2011-2013) XIV научно-методическая конференция «Информатика: проблемы, методология, технологии»(2014).

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 16 научных работ, в том числе 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и приложений. Общий объем диссертации 120 страниц.

Глава 1 Обзор существующих разработок по математическому моделированию компоновки промышленных объектов

Необходимым условием развития экономики страны является качественное развитие промышленных объектов. В современных условиях проектирование промышленных объектов должно обеспечивать получение оптимальных проектных решений со стороны некоторых критериев. Это может быть достигнуто путем применения математического моделирования и численных методов, реализованных в виде комплексов программ для электронно-вычислительной техники, на различных этапах проектирования.

Наряду с разработкой современных технологических решений для промышленных производств существенным является конструкторское проектирование объектов. В рамках конструкторского проектирования выбирается пространственная модель будущего промышленного объекта, включающая строительные конструкции, размещенное оборудование, сеть технологических соединений, вспомогательное оборудование и конструкции. Оптимальность получаемого решения на этом этапе во многом влияет на стоимость реализации проекта. Также от полученного решения зависят затраты на производство и как следствие себестоимость продукции и эффективность производства.

В конструкторском проектировании технологических систем особо важным и одним из наиболее сложных этапов является этап топологического синтеза. На данном этапе решается задача разработки укрупненной структуры проектируемого объекта. При этом решаются творческие, трудно-формализуемые задачи (определение геометрической формы системы (монтажного пространства); выбор элементов системы и др.) [9,12]. Также решаются задачи, которые могут быть формализованы и автоматизировано решены с использованием специализированных программно-аппаратных комплексов. Примером таких задач

являются задачи размещения элементов систем и трассировки соединений этих элементов.

Существует целый класс задач, связанных с компоновкой промышленных объектов (например, компоновка цехов химического производства, компоновка печатных плат и т.д.). Общим в перечисленных задачах является то, что имеется набор объектов, которые надо разместить (аппараты, станки, элементы и т.д.) и имеется набор областей размещения (помещения химического или машиностроительного предприятия, печатная плата и т.д.). Размещаемые объекты и области размещения, обладают определенными характеристиками или свойствами (размеры, назначение, категория). Объект считается размещенным, если однозначно определено его положение в пространстве. Это могут быть координаты некоторой характерной точки объекта, например, координаты центра или координаты диагональных углов.

Все эти задачи различаются наложенной на них системой ограничений и выбором критерия оптимальности. Выбор ограничений зависит от технологических особенностей, условий эксплуатации проектируемых систем, условий работы оборудования, персонала, условий обслуживания и других факторов. Эти ограничения содержатся в нормативных документах: СНиП (сборники нормативов и правил), ПБ (правила проектирования безопасных технических объектов) и др., которые определены в каждой предметной области. При наличии опыта, человек (проектировщик), занимающийся размещением, может дополнительно накладывать свои ограничения, которых нет в нормативных документах. Кроме того, существует, по крайней мере, одно ограничение общего характера – это непересечение размещаемых объектов друг с другом.

При этом ограничения серьезно сужают область возможных решений задачи, позволяя получать более точные оптимальные результаты за приемлемое время. Выбор ограничений, необходимых для решения конкретной задачи, является сложной задачей и зависит от опыта и интуиции проектировщика. Не

менее сложной задачей является задание ограничений в виде, пригодном для расчета на ЭВМ.

Математические модели компоновки различаются в зависимости от накладываемых ограничений, способа их задания. Также от выбора системы и вида ограничений зависит выбор метода решения задачи компоновки. При этом не существует единого подхода к решению различных задач этого класса. Поэтому для решения новой задачи зачастую приходится прибегать к разработке новой модели или модификации существующей и, как следствие, модификации программного комплекса. Это требует значительных капитальных вложений, что снижает экономический эффект от внедрения нового объекта.

Другим вариантом решения данной проблемы является автоматический учет только основного набора ограничений (отсутствие пересечений объектов, соблюдение минимальных расстояний). В этом случае контроль требований нормативных документов осуществляется непосредственно лицом, принимающим решения. Поэтому качество получаемого решения зависит от квалификации проектировщика. Но для получения наиболее оптимального решения, что является необходимым требованием современного мира, требуется минимизировать человеческий фактор.

Сама задача поиска оптимального компоновочного решения при проектировании и модернизации промышленных объектов, относится к сложным, многоуровневым, итерационным процедурам принятия проектных решений, и не существует её простого и однозначного решения. Известно, что подобные задачи относятся к классу NP-полных задач математического программирования. Если обозначить размерность задачи равной n , то затраты машинного времени на решение таких задач растут в соответствии с $n!$ или e^n , что приводит, при сравнительно небольшом увеличении количества размещаемого оборудования n к резкому возрастанию времени получения результата, часто превышающему предел возможностей даже самого современного компьютера. Обычно, для задач размещения поиск точного решения возможен лишь для числа размещаемых

объектов исчисляемого в 20-30 единиц. Лишь в некоторых случаях, когда ограничения и возможные критерии компоновки упрощаются, удаётся найти точное решение для большего числа размещаемых объектов.

Исходя из этого разработка подхода к математическому моделированию компоновки промышленных объектов, позволяющего гибко задавать систему ограничений, учитывающих различные требования к проектируемому объекту, является актуальной научной и практической задачей.

1.1 Анализ задач компоновки

Среди исследователей нет общего и точного определения задачи компоновки. Наиболее часто встречаются постановки задачи, связанные со статической задачей компоновки. Такая задача определяется как общая промышленная задача, целью которой является конфигурация объектов, таким образом, чтобы минимизировать затраты на транспортировку материала между ними [77]. Согласно другому определению, задача компоновки состоит в нахождении расположения на плоскости N непересекающихся прямоугольных объектов в пределах заданного прямоугольного плана участка таким образом, чтобы минимизировать критерий расстояния между объектами [94]. По еще одному определению, задача компоновки состоит в размещении N объектов различных размеров в пределах заданного общего пространства, которое может быть ограничено по длине или ширине, таким образом, чтобы минимизировать общую стоимость транспортировки веществ и стоимость участка [86]. В [8,108] определена задача компоновки промышленных предприятий, как задача оптимального проектирования с учетом различных взаимодействий между объектами и системами транспортировки при получении компоновочного решения. Вопросам математического моделирования компоновки оборудования объектов химических производств и автоматизации их проектирования посвящены работы [15,16].

Рассмотрим существенные признаки для характеристики задачи компоновки в виде дерева факторов (рисунок 1.1), принимаемых во внимание в литературе. На самом деле, задачи, которые решаются в исследовательских работах отличаются в зависимости от таких факторов, как: характеристики цеха, постановка задачи, в том числе критерий и ограничения, подходы, используемые для ее решения.

Постановка задачи компоновки сильно зависит от специфики производственных систем. Существует несколько факторов, которые позволяют определить характер задач, в частности: ассортимент и объем производства, различные возможные методы транспортировки, количество этажей, на которых может располагаться оборудование, форма объектов и выбор мест загрузки/разгрузки. В связи с важностью этих факторов они подробно описаны ниже.

Выбор компоновочной схемы часто зависит от объема и ассортимента производства. В существующих работах рассматриваются следующие типы организации: фиксированная компоновка, компоновка по технологическим процессам, компоновка по типу продукта, и сотовая компоновка [51]. Эти ключевые организации рассматриваются авторами по-разному.

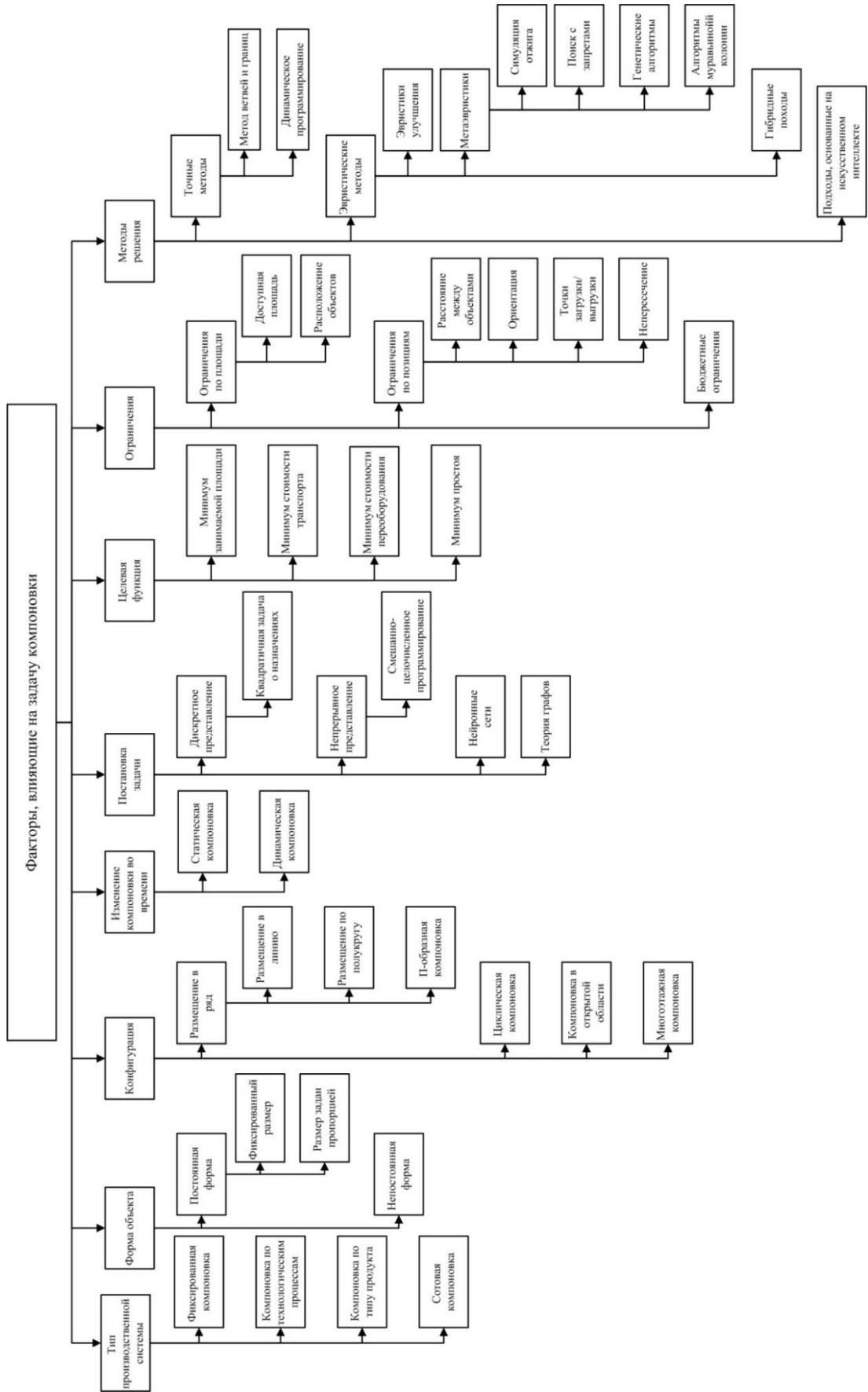


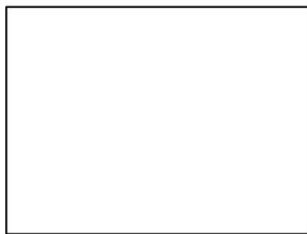
Рисунок 1.1 – Факторы, влияющие на задачу компоновки

При компоновке по технологическим процессам группируется оборудование, выполняющее одинаковые функции (ресурсы одного типа). Часто указывается, что данная организация подходит для многоассортиментных производств.

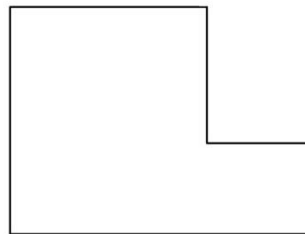
Компоновка по типу продукта используется для систем с большим объемом производства и малым ассортиментом. Объекты размещаются в соответствии с последовательностью технологических операций.

При сотовой компоновке объекты сгруппированы в ячейки для обработки семейства подобных деталей. Эти блоки размещаются в заводских цехах. Эта задача обычно связана с задачей компоновки внутри ячейки [64,104]. Здесь речь идет о поиске лучшего расположения объектов в каждой ячейке.

Часто рассматривают объекты двух различных форм (рисунок 1.2): постоянной, обычно прямоугольной и непостоянной, то есть, заданной полигонами [74,83]. Объект может иметь заданные размеры, определенные фиксированной длиной L_i и фиксированной шириной w_i . В этом случае, объекты называются фиксированными или жесткими блоками. Объект также может быть определен по площади S , пропорции $a_i = L_i / W_i$, верхней границе a_{iu} и нижней границе a_{il} таким образом, что $a_{il} < a_i < a_{iu}$. [47] Это соотношение также использовалось в [94]. В случае объектов фиксированной формы соотношение примет вид $a_{il} = a_i = a_{iu}$ [47].



Постоянная форма



Непостоянная форма

Рисунок 1.2 – Форма объектов

Система транспортировки обеспечивает доставку материала в соответствующие места. Транспортное оборудование может быть следующих видов: конвейеры, автоматизированные управляемые машины, роботы и т.д. [56]. 20-50% производственных затрат обусловлены транспортом деталей. Оптимизация размещения транспортных устройств может уменьшить их на 10-30% [113].

При работе с системой транспортировки материалов, задача состоит в размещении объектов по транспортной линии. Рассматриваются две взаимосвязанные задачи проектирования: нахождение размещения объектов и выбор транспортного оборудования. Тип транспортного устройства определяет шаблон, который будет использоваться для размещения объектов [50,67]. Схема территории предприятия влияет на выбор вспомогательных средств [48]. Принимая во внимание сложность решения обеих задач совместно, они в основном решаются последовательно [65]. Среди основных типов компоновки в зависимости от типа транспорта, можно выделить (рисунок 1.3): компоновка в ряд, компоновка в несколько рядов, циклическая компоновка и компоновка в открытой области [120].

Задача компоновки в ряд имеет место тогда, когда объекты должны быть размещены вдоль линии [52,60,72,80]. Можно рассматривать несколько частных случаев такого размещения такие, как прямая линия, полукруг или П-образное размещение [65]. Задача циклической компоновки заключается в размещении m объектов в $\overline{1, M}$ возможных областях размещения в замкнутой кольцевой сети, по которой детали транспортируются в одном направлении [39,42,43,98,103]. Цикл включает в себя погрузочно-разгрузочную станцию, т. е. место, из которого детали входят и выходят из цикла. Эта станция является уникальной и предполагается, что она располагается между положением m и 1. Компоновка в несколько рядов заключается в размещении объектов по нескольким линиям [65]. При этом транспортировка происходит как между объектами одного ряда, так и между рядами [41,60,72]. Компоновка в открытой области соответствует

ситуации, когда объекты могут быть размещены без условий или ограничений, которые вызваны такими вариантами размещения, как компоновка в линию или циклическая компоновка [120].

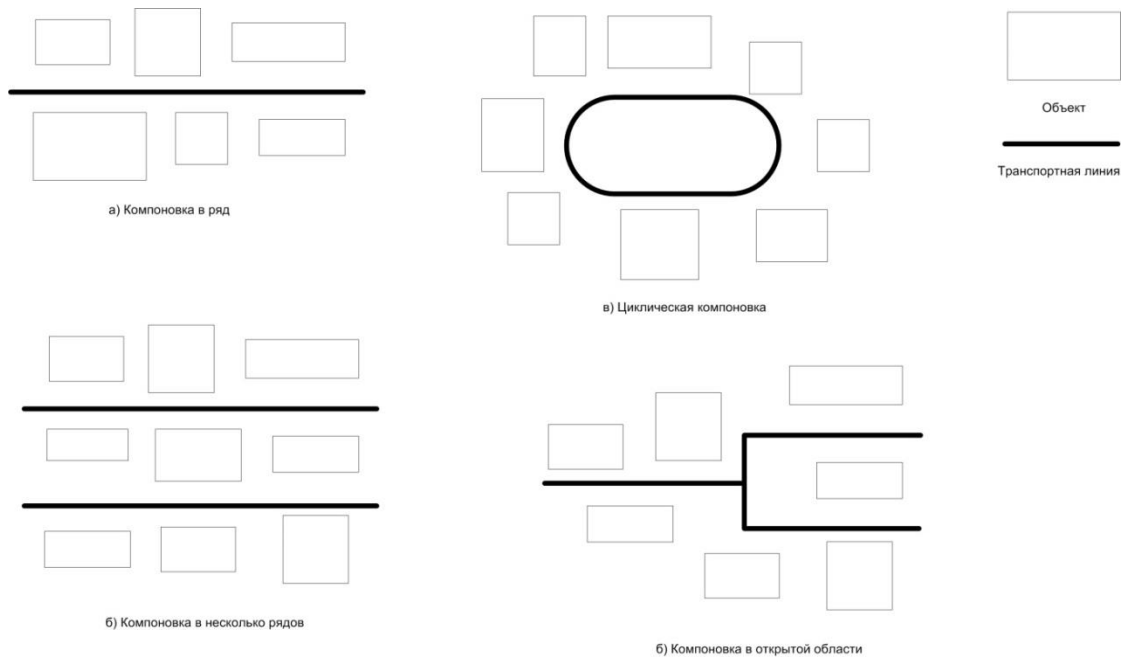


Рисунок 1.3 – Типы компоновки

В настоящее время, когда речь заходит о строительстве завода в городской местности, земельных участков, как правило, недостаточно, и их цена достаточно высока. Ограничение доступного пространства в горизонтальной плоскости создает необходимость использовать пространство цеха по вертикали. Тогда, возможен поиск размещения объектов на нескольких этажах, как показано на рисунке 1.4. Этот пример показывает, что транспорт может осуществляться как горизонтально на одном этаже (горизонтальное направление потока), так и с одного этажа на другой (вертикальное направление потока). Для вертикальной транспортировки требуется соответствующее устройство, например, лифт, насос и др. В таком случае, для каждого объекта должны определяться этаж и расположение на этаже. Связанные с этим задачи называют задачами компоновки в многоэтажных цехах [76].

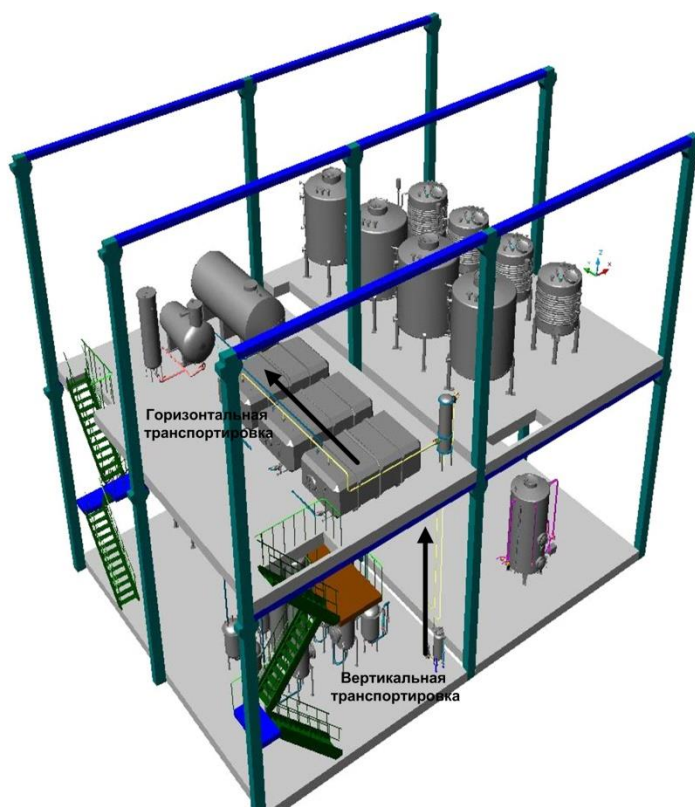


Рисунок 1.4 – Компонировка в многоэтажных цехах

Задача компоновки в многоэтажных цехах поставлена в работах [7,70] как задача определения относительного расположения объектов в многоэтажном здании. Позже другие исследователи сосредоточены на учете вертикальной транспортировки веществ между этажами. [36,92,93] Количество и расположение устройств для транспортировки веществ либо является исходными данными, либо определяется в процессе оптимизации. [84,89] Мощность каждого устройства может считаться ограничением. [89] Количество этажей также может являться исходными данными при решении задачи или определяться, в зависимости от площади, занимаемой размещаемыми объектами. [101]

Характеристики цеха вносят различия в способ проектирования компоновки. Кроме того, хорошо известно, что в настоящее время, производственные предприятия должны быть в состоянии быстро реагировать на изменения спроса, объемов производства и ассортимента продукции. В среднем, 40% продаж компании за счет новых продуктов [99]. Тем не менее, изменения в ассортименте продукции вызывают изменения производственной линии и таким

образом влияют на компоновку. Большое количество авторов пытались взять такой важный вопрос во внимание. В большинстве работ, касающихся задачи компоновки, рассматривают статическую задачу. Другими словами, они предполагают, что ключевые данные о цехе и производстве будут оставаться постоянным в течение достаточно длительного периода времени. В последнее время идея динамических задач компоновки вводится рядом исследователей. В такой задаче компоновки учитываются возможные изменения в потоке обработки материалов в течение нескольких периодов. В этом случае, горизонт планирования, как правило, делится на периоды, которые могут быть определены в неделях, месяцах или годах. Для каждого периода, по оценкам, поток данных остается постоянным. Компоновочное решение в динамической задаче компоновки состоит из множества вариантов, каждый из которых связан с периодом [31,38,78,96].

Целью оптимизации является определение расположения для каждого периода в горизонте планирования, при минимизации суммы затрат на транспортировку продукта, для всех периодов, и суммы расходов на перегруппировку производства между временными периодами [31,34]. Расходы на перегруппировку производства должны быть учтены при перемещении объектов из одного места в другое [32].

1.2 Постановка задачи компоновки

Рассмотрев влияние характеристик цеха и статическую или динамическую задачу компоновки, можно сформулировать несколько математических постановок задачи компоновки. Такая постановка статической и динамической задач компоновки может быть основана на нескольких типах моделей, учитывающих комплекс отношений между различными элементами, участвующими в задаче компоновки. Такие модели основаны на различных принципах, которые включают теорию графов [104,75,87] или нейронных сетей

[114]. Эти модели, как правило, используются для получения решения задачи компоновки, которую большинство исследователей считают задачей оптимизации с одним или несколькими критериями. В зависимости от постановки задачи, то есть дискретной или непрерывной, можно выделить следующие виды: квадратичная задача о назначениях или смешанно-целочисленное программирование - которые являются наиболее часто встречающимися. В каждом случае, некоторые авторы утверждают, что имеющиеся данные могут быть не известны точно и предложили нечеткие формулировки

Рассмотрим задачу компоновки в виде дискретной задачи оптимизации (рисунок 1.5а). В таком случае, соответствующая задача оптимизации рассматривается как квадратичная задача о назначениях. Площадь цеха разделяется на прямоугольные блоки равной площади и формы, и объекты размещаются внутри блоков[61]. Если объекты имеют разную площадь, они могут занимать несколько блоков [116].

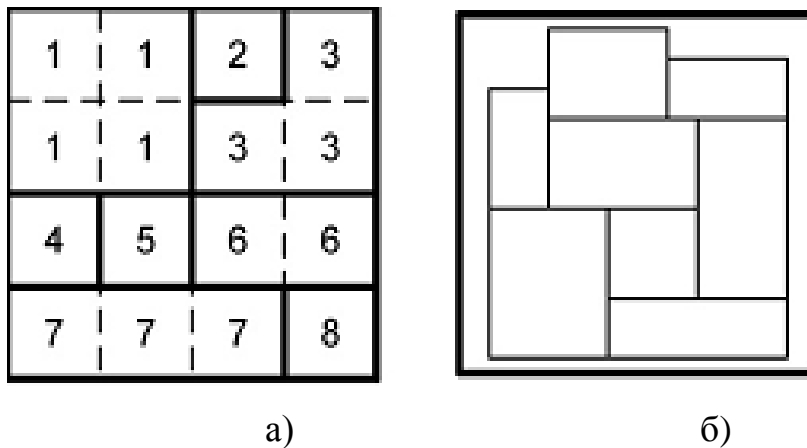


Рисунок 1.5 – Дискретное и непрерывное представление компоновки

Типовая постановка задачи определения относительного местоположения объектов при минимизации расходов на транспорт продукта выглядит следующим образом: [30]

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N f_{ik} d_{jl} X_{ij} X_{kl} \rightarrow \min, \quad (1.1)$$

при

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 1, j = \overline{1, N} \quad (1.2)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} = 1, i = \overline{1, N} \quad (1.3)$$

где N – количество размещаемых объектов; f_{ik} – стоимость транспортировки продукта от объекта i к k ; d_{jl} – расстояние между блоками j и l ; $X_{ij} = 0,1$ – переменная для определения местоположения объекта i в блоке j . Целевая функция (1.1) представляет собой сумму расходов на транспортировку продукта между каждой парой объектов. Уравнение (1.2) гарантирует, что каждый блок содержит только один объект и уравнение (1.3) гарантирует, что каждый объект размещен только в одном месте.

Дискретное представление задачи компоновки обычно используется для динамической задачи. В этом случае задача заключается в размещении равных по размеру объектов при выполнении следующих ограничений: в каждом блоке размещается только один объект в каждом периоде, каждый объект размещается только в одном блоке в каждом периоде. Бюджетные ограничения могут быть добавлены для проведения реконфигурации объектов на этаже. Например, расходы на перегруппировку не должны превышать определенного уровня бюджета [33,91].

Дискретные представления не подходят для представления точного положения объектов в производственной зоне и не позволяют моделировать соответствующие конкретные ограничения, такие как ориентация объектов, точки погрузки-разгрузки или расстояние между объектами. В таких случаях, более подходящим является непрерывное представление [49,55].

Во многих работах рассматривается непрерывная задача компоновки (рисунок 1.5б). Она часто рассматривается как задача смешанного целочисленного программирования. Все объекты размещаются в любом месте внутри плоской области, при условии отсутствия пересечений между ними [49,55].

Положение объекта в производственной зоне задается либо по координатам центра тяжести (x_i, y_i) , половине длины l_i и половине ширины w_i , либо по координатам нижнего левого угла, длине L_i и ширине W_i объекта. Расстояние между двумя объектами может быть выражено, например, через прямолинейную норму:[47]

$$d_{ij}((x_i, y_i), (x_j, y_j)) = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (1.4)$$

Точки погрузки-разгрузки добавляют ограничения в постановку задачи компоновки. В этом случае расстояние, пройденное продуктом из точки разгрузки объекта i в точку погрузки объекта j , определяется формулой (1.5):

$$d_{ij} = |x_i^O - x_j^I| + |y_i^O - y_j^I| \quad (1.5)$$

где (x_i^O, y_i^O) - координаты точки разгрузки объекта i , и (x_j^I, y_j^I) координаты погрузки объекта j [74,120].

Определение лучших мест точек погрузки разгрузки является отдельной задачей, рассмотренной в [25,45,73].

Очевидно, что существует ограничение на площадь производственной зоны, то есть общая доступная площадь должна быть больше или равна сумме площадей, занимаемых объектами. Площадь, выделенная под каждый объект на плане этажа должна также принимать во внимание пространство для других ресурсов, которые необходимы для работы объектов [82]. Расстояния между объектами могут быть включены в поверхность объекта [37,67,69].

Другим очень важным ограничением является отсутствие пересечения объектов. Два условия отсутствия пересечения объектов: условие непересечения X-проекции (1.6) и условие непересечения Y-проекции (1.7):

$$(x_{jt} - x_{ib})(x_{jb} - x_{it}) \geq 0 \quad (1.6)$$

$$(y_{jt} - y_{ib})(y_{jb} - y_{it}) \geq 0 \quad (1.7)$$

где $(x_{ib}, y_{ib}), (x_{it}, y_{it})$ - координаты соответственно верхнего левого и нижнего правого угла объекта i ; $(x_{jb}, y_{jb}), (x_{jt}, y_{jt})$ - координаты соответственно

верхнего левого и нижнего правого угла объекта j [117]. В работе [97] для записи этого ограничения определена область пересечения двух объектов A_{ij} . Тогда задача оптимизация компоновки выражается следующим образом:

Найти минимум целевой функции, при:

$$A_{ij} \leq 0, \quad (1.8)$$

где

$$A_{ij} = \lambda_{ij} (\Delta X_{ij}) (\Delta Y_{ij});$$

$$\Delta X_{ij} = \lambda_{ij} \left(\frac{L_i + L_j}{2} \right) - |x_i - x_j|;$$

$$\Delta Y_{ij} = \lambda_{ij} \left(\frac{W_i + W_j}{2} \right) - |y_i - y_j|;$$

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{при } \Delta X_{ij} \leq 0 \text{ и } \Delta Y \leq 0; \\ 1, & \text{в др. случаях} \end{cases};$$

W_i, L_i - ширина и длина объекта i ;

(x_i, y_i) - координаты объекта i .

Другие ограничения могут быть также рассмотрены в постановке задачи. Например, заранее определенная ориентация некоторых объектов. С учетом таких ограничений, постановка задачи оптимизации может быть следующей:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} (|x_j^I - x_i^O| + |y_j^I - y_i^O|) \rightarrow \min \quad (1.9)$$

где N - количество размещаемых объектов, f_{ij} - стоимость транспортировки продукта от точки разгрузки объекта i до точки загрузки объекта j , (x_i^O, y_i^O) - координаты точки разгрузки объекта i , и (x_j^I, y_j^I) координаты загрузки объекта j [55].

В работах [5,6] обобщенная математическая модель компоновки промышленных объектов химических производств. Она включает в себя как общие ограничения, характерные для различных постановок задачи, так и условия

характерные для определенных постановок задачи (например, многоэтажная компоновка, компоновка в ряд, компоновка по отделениям).

Во многих случаях, данные необходимые для решения задачи компоновки точно не известны. Редко встречаются стохастические подходы такие, как сети обслуживания [96]. Для обработки неточностей или неопределенностей, которые часто встречаются, предложено использовать нечеткую логику [59,105]. Существуют несколько подходов для проектирования компоновки, основанные на нечетких понятиях.

В [59] авторы обратились к размещению объектов неравных размеров на территории завода. Они выразили отношения между каждой парой объектов нечеткими отношениями описания близости и важности. Эти отношения позволяют аналитику указать важность, связанную с каждой парой объектов, которые будут расположены на любом расстоянии друг от друга. Авторы предложили нечеткую постановку задачи через лингвистические переменные и эвристический анализатор. В [62,63] рассмотрена задача размещения n объектов на n фиксированных местах так, чтобы минимизировать общую стоимость транспорта. Данные, влияющие на компоновку, такие как близость связей и интенсивность движения, являются нечеткими и моделируются через лингвистические переменные и нечеткие выводы. Эвристические процедуры, на основе бинарных нечетких отношений, разработанная для выбора и размещения объектов в доступных местах. Некоторые принципы этого подхода также используются в [63], где рассмотрена задача нахождения лучшего расположения объектов на производственной площадке, основываясь на спецификации внутренних связей между объектами, которые характеризуются через лингвистические переменные. Авторы разработали систему поддержки принятия решений на основе набора нечетких правил.

В большинстве работ, посвященных задаче компоновки, основная задача заключается в минимизации функции, связанной с транспортировкой продукта (общая стоимость транспорта, время транспортировки, расстояние и т.д.). Для

получения более реальных показателей некоторые исследователи рассматривают более одного критерия. Например, одновременная минимизация стоимости транспорта, оборудования и обслуживания. Большинство авторов объединяет различные критерии в один либо с помощью метода анализа иерархий или с использованием линейной комбинации различных критериев [40,119]. Также рассматриваются экономические критерии, включающие различные показатели качества получаемого решения. Например, критерий приведенных затрат включает в себя стоимость капитальных затрат (монтажа оборудования, трубопроводов, металлоконструкций и пр.) и стоимость эксплуатационных затрат (затраты на энергию для осуществления транспорта веществ, стоимость обслуживания и ремонта и пр.). [5]

Некоторые исследователи использовали подход Парето для создания множества компромиссных решений. Например, задача компоновки, связанной с минимизацией затрат на транспортировку и максимизацией функции [26].

Наиболее универсальным способом математического моделирования компоновки является использование теории графов. Наибольшее распространение получили ориентированные графы, гиперграфы и мультиграфы. Использование теории графов позволяет описать структуру проектируемой системы, систему технологических связей. [17] Однако графы не учитывают свойства размещаемых объектов, а также требуют отдельного представления монтажного пространства.

Задание свойств объектов и областей размещения, а также их взаимосвязи возможно с применением N -ориентированных гиперграфов с ограничениями. Применение данного математического аппарата позволяет абстрагироваться от конкретной предметной области и работать с задачей компоновки некоторых объектов в заданной области. [18]

Операции над гиперграфами применяются для компоновки схем ЭВМ. В этом случае задача компоновки сводится к разрезанию гиперграфа на куски, то есть непересекающиеся подмножества вершин, соответствующие отдельным модулям схем. Использование операций над гиперграфами позволяет получить

результат в виде L кусков гиперграфов, являющихся моделью схемы, заключенной в соответствующей вершине дерева функционального вхождения, т. е. реализовать описанную часть процесса компоновки, сделав процесс решения задачи более наглядным. [20]

Для структурного синтеза технических систем также предложено использовать полихроматические гиперграфы. Применение этого аппарата описано в работах [21,22,23].

1.3 Подходы к решению задачи

Существует несколько подходов к решению различных типов задач, которые сформулированы в литературе. Они направлены либо на поиск хорошего решения, которое удовлетворяет определенным ограничениям, заданным ЛПР, либо на поиск глобальных или локальных оптимальных решений относительно одного или нескольких показателей. Выходом является применение основанных на эвристике алгоритмов оптимизации. [58,95,109,121]

Было предпринято несколько попыток использования искусственного интеллекта для решения задачи компоновки [68,81]. Экспертная система на основе искусственных нейронных сетей была реализована для проектирования компоновки производственной системы [46].

Несколько типов оптимизации были предложены в литературе. Разделим их на точные методы, такие, как метод ветвей и границ, и приближенных подходы, такие как эвристика и метаэвристики.

Среди точных подходов можно выделить метод ветвей и границ. [11,100] Например, он применяется для однонаправленной задачи циклической компоновки [79]. Также такой подход используется для решения задачи размещения n прямоугольных объектов в пределах заданной прямоугольной области. Для этого предложены общие классы правильных неравенств, основанные на ациклическом подграфе, чтобы увеличить спектр решаемых задач

и использовать их в алгоритме ветвей и границ [94]. В работе [73] обратились к задаче нахождения точек загрузки/разгрузки на объектах фиксированного размера для заданной компоновки. Цель задачи состоит в минимизации общего расстояния материальных потоков между загрузки/разгрузки точками. Авторы предложили использовать метод ветвей и границ для поиска оптимального расположения загрузки/разгрузки точек для каждого объекта. В [106] использован метод динамического программирования для решения динамической задачи компоновки с объектами равного размера. Однако лишь в случаях небольшой размерности задача была решена оптимально (шесть объектов и пять периодов времени). Также для поиска оптимального варианта компоновки применяют методы нелинейной оптимизации. [115]

Поскольку точные методы часто не подходят для задач больших размерностей, многочисленные исследователи разрабатывают эвристики и метаэвристики.

Конструирующие методы последовательно формируют множество объектов, пока не будет получен вариант компоновки. Методы улучшения решения начинают с одного исходного решения и пытаются улучшить его с получением нового решения. Примером конструирующих эвристик являются: CORELAP [85], ALDEP [107] и COFAD [112], SHAPE [66]. Примером эвристик улучшения являются: CRAFT [27], FRAT [71] и DISCON [53], а также эвристическо-топологические методы, описанные в [13].

Среди подходов, основанных на метаэвристике, можно выделить методы глобального поиска (поиск с запретами и метод моделирования отжига) и эволюционные подходы (генетические алгоритмы и алгоритмы колонии муравьев).

В [44] описан алгоритм поиска с запретами для решения задачи размещения оборудования. Алгоритм основан на обмене двух местоположений для двух объектов и включает долгосрочную структуру памяти, динамический список запретов, критерий интенсификации и стратегию диверсификации.

Метод имитации отжига используется для решения задачи компоновки с объектами пропорциональных размеров [47]. Предлагаются две процедуры обмена: попарно обмена между объектами и случайные ходы на плоскости в четырех основных направлениях (вверх, вниз, влево и вправо). В [91] предложены два подхода имитации отжига для динамической задачи компоновки с объектами равного размера. В первом методе имитации отжига используются окрестности, определяемые на основе метода попарного обмена, который заключается в случайном изменении местоположения двух объектов для улучшения решения. Второй подход сочетает в себе первый и метод поиска по окрестности для улучшения решения.

Генетические алгоритмы стали весьма популярны в решении задачи компоновки [57,102]. Большое количество исследований с использованием таких подходов было опубликовано как для статических задач компоновки [28,54,111,116,118], так и для динамических задач компоновки [29,31,55].

Для задач дискретной компоновки авторы используют отличную от задач непрерывной компоновки схему кодирования. Популярное решение кодирования компоновки для дискретного представления основывается на кривых заполнения пространства. [116] Площадь завода делится сеткой, кривой заполнения пространства определяет непрерывную последовательность среди всех соседних квадратов. Заполняющие пространство кривые гарантируют непрерывность объекта. [35] Тем не менее, этот метод требует много правил для проверки соединения всех позиций компоновки, например, с помощью экспертных правил. [116]

Решение должно быть закодировано для использования стратегии заполнения пространства кривых. Строка разделяется на три сегмента: кодировка последовательности объектов, площадь, необходимая для каждого объекта и ширина каждой группы. Предложена кодировка генами хромосомы через пять сегментов строки. Первый сегмент показывает номер объекта размещения в последовательности. Второй содержит количество областей для

каждого отдела. Третий сегмент указывает на размер области (длина и ширина). Четвертый сегмент показывает направление покрытия (1: горизонтальные, 2: вертикальное) и пятый сегмент указывает на ширину полосы. [116]

Целевая функция, используемая в эволюционных методах, как правило, представлена в виде математической функции стоимости. Для того чтобы более реалистично учесть производительность системы, вместе с эволюционными методами для оценки вариантов решений используются имитационные модели. [28]

Оптимизация методом колонии муравьев также недавно применяется для решения задачи размещения. Муравьиный алгоритм для направленной задачи компоновки в один ряд представлен в [110]. В [34] предложен алгоритм муравьиной колонии для решения безусловной и бюджетно-ограниченной динамической задачи компоновки.

Объединение различных метаэвристики также рассматривается для решения задач компоновки. В работе [88] предложил гибридный подход к минимизации стоимости транспорта. В работе использовался алгоритм имитации отжига для решения геометрических аспектов задачи, генетические алгоритмы для принятия решений о системе транспорта и точный метод (метод Хичкока), чтобы минимизировать общую стоимость транспорта. В [97] представлен гибридный подход для задачи компоновки с объектами неравной площади. Исходя из начального варианта решения, полученного при помощи алгоритма имитации отжига, оптимальное положение объектов определяется аналитический метод поиска в многоступенчатом процессе оптимизации. Применение гибридного генетического алгоритма для задачи компоновки объектов фиксированной формы и неравной площади представлено в [86]. Поиск с запретами и имитация отжига сначала используются для поиска локальных решений, а генетический алгоритм вводится в середине локального процесса поиска для поиска глобального решения. Кроссовер основан на методе динамического программирования, а

мутация достигается CRAFT эвристикой. Три гибридных алгоритма колонии муравьев объединены для динамической задачи компоновки объекта. Они сочетают в себе метод колонии муравьев с тремя процедурами локального поиска: процедура случайного попарного обмена, алгоритм имитации отжига и процедура поиска по окрестности [90].

1.4 Обзор программных продуктов по компоновке промышленных объектов

В настоящее время множество как зарубежных, так и российских компаний занимаются разработкой систем автоматизированного проектирования. Эти системы применяются на всех стадия проектирования, в том числе на стадии компоновки технологической системы. Среди них можно выделить следующие: PDS (Integrgraph); PDMS (Cadcentre); CADPIPE (JEC Design Group); CADWORX (COADE); AutoPLANT (Bentley); PLANT-4D (CEA Technology), Autodesk Plant Design Suite (Autodesk), Model Studio CS Технологические схемы (CSoft), Model Studio CS Трубопроводы (CSoft). [1,14]

CADWORX и CADPIPE, разработанные фирмами COADE и AEC Design Group соответственно, требуют адаптации и настройки для применения в российских условиях. Это не возможно сделать без помощи разработчиков.

PDS и PDMS являются мощными программными комплексами, выполняющими проектирование с учётом стандартов, а также СНиП. Но эти системы требуют сложной длительной адаптации, что усложняет их внедрение. А высокая стоимость снижает эффект от их внедрения практически до нуля.

PLANT-4D разработана голландской компанией CEA-Technology. PLANT-4D полностью настроен для работы на русском языке: переведены меню, панели инструментов, командная строка, написаны учебные пособия (с учётом российской специфики).

Адаптация системы включает также базы данных, которые предусматривают работу по российским государственным, отраслевым и корпоративным стандартам.

Autodesk Plant Design Suite является комплексом систем автоматизации конструкторского проектирования, разработанным компанией Autodesk. Для автоматизации компоновки в этом комплексе присутствует система AutoCAD Plant 3D. Рассмотрим этот компонент подробнее.

AutoCAD Plant 3D вполне справляется с построением трехмерных моделей, но имеет существенные недостатки, связанные с выпуском проектной документации по российским стандартам, которые на данный момент в AutoCAD Plant 3D выполняются практически вручную. Необходимы достаточно большие доработки и настройки.

Обязательным условием при трассировке трубопроводов в AutoCAD Plant 3D 2012 является использование конкретных типоразмеров изделий, а это не всегда возможно на ранних стадиях выполнения проекта, когда еще не определены все типоразмеры изделий. AutoCAD Plant 3D не позволяет создавать эскизы трасс с минимальной информацией о трубопроводе: такой подход может вызвать затруднения при создании модели и привести к задержке выпуска проектов при внесении изменений в проект по требованию заказчика.

В AutoCAD Plant 3D нет собственного функционала для проверки модели на коллизии. Модель, созданная в Plant 3D, так же, как и модели из других программ — Model Studio CS Трубопроводы, AutoPLANT, PLANT-4D, — может быть проверена на коллизии в среде Autodesk Navisworks Manage, что потребует дополнительных инвестиций и немалых трудозатрат на подготовку модели к этой проверке. Таким образом, для проверки на коллизии пользователю необходимо приобрести дополнительное программное обеспечение — недешевый Autodesk Navisworks Manage (это приведет к удорожанию рабочего места более чем на 100 тыс. руб.). Однако, Autodesk Navisworks Manage входит в состав комплекса Autodesk Plant Design Suite.

Для передачи данных из AutoCAD Plant 3D в расчетные программы реализован экспорт в формат PCF. При передаче информации из AutoCAD Plant 3D в программу СТАРТ необходимо тщательно настроить и проверить соответствие параметров модели, иначе результаты расчета могут оказаться неверными. Таким образом, можно считать, что потенциальная возможность передать информацию имеется, но требуется проверка и, возможно, настройка в зависимости от используемой исходной базы деталей.

Передача информации в программу «Изоляция» в AutoCAD Plant 3D не реализована, поэтому для проектирования изоляции трубопроводов и технологического оборудования требуется ручной ввод информации.

Средства AutoCAD Plant 3D позволяют получать чертежи из трехмерной модели, однако сам чертеж представляет собой набор блоков, что затрудняет его дальнейшее редактирование. Для оформления видов и разрезов автоматически отрисовываются осевые линии и есть возможность простановки аннотаций вручную. Никаких функций автоматической простановки размеров, высотных отметок, выносок в AutoCAD Plant 3D не реализовано. Оформление видов и разрезов — сложный и трудоемкий процесс, требующий повышенного внимания инженера и являющийся критичным для проекта. Отсутствие специальных функций оформления чертежей делает трехмерное проектирование в AutoCAD Plant 3D существенно менее продуктивным, чем это могло бы быть.

В полном составе Autodesk Plant Design Suite имеет широкий спектр возможностей, таких как Анализ коллизий и пространственных ограничений, экономичное производство благодаря оптимизации на ранних стадиях, проектирование эффективных технологических линий.

Серия программных комплексов Model Studio CS, включающая Model Studio CS Технологические схемы, Model Studio CS Трубопроводы, разработана российской группой компаний CSoft. Model Studio CS предназначена для разработки в трехмерном пространстве компоновочных решений таких инженерных систем промышленных объектов. Данный программный комплекс предусматривает

возможность выполнения трехмерной компоновки, расчета (встроенные расчеты, возможность передачи данных во внешние расчетные комплексы), выпуска проектной и рабочей документации (чертежей, спецификаций и т.д.). Система разработана с учетом российских норм и стандартов, а также отечественных методик расчета и проектирования. Серия Model Studio CS имеет единую базу данных оборудования, изделий и материалов, единые средства выпуска и оформления выходной документации. На сегодняшний день Model Studio CS является наиболее удачным решением среди систем проектирования за счет простоты внедрения, разработки под российские стандарты. Также преимуществом системы является внедрение трехмерного проектирования на основе AutoCAD (2006–2009) и программных средств, в состав которых AutoCAD включен (AutoCAD Architecture, AutoCAD Civil 3D и т.д.). Но, несмотря на широкий функционал системы, в ней отсутствует возможность автоматического контроля ограничений, кроме проверки на наличие коллизий. Соблюдение же других норм при автоматизированном проектировании промышленных объектов является задачей пользователя. Это усложняет процесс проектирования крупных промышленных объектов и увеличивает вероятность ошибки в них.

Проанализировав современные коммерческие системы автоматизированного конструкторского проектирования, можно сделать вывод, что решение во многом зависит от способностей человека создавать, анализировать и принимать проектные решения. При этом контроль выполнения норм и правил проектирования автоматизирован лишь в области коллизий. А выбор наилучшего с точки зрения определенных критериев варианта затруднен необходимостью самостоятельно синтезировать и анализировать множество вариантов. Также большую сложность составляет адаптация программных комплексов под российские нормы.

1.5 Заключение и направление исследования

В этой главе рассмотрены различные варианты постановки задачи, аспекты, влияющие на нее, и методы решения задачи компоновки.

Прежде всего, последние работы включают в себя все более и более сложные и реалистичные характеристики изучаемых систем производства. Типичными примерами являются точки загрузки/разгрузки, проходы, сложные геометрические ограничения, учет нескольких этажей, которые принимаются во внимание при решении задачи компоновки. Это действительно важный вопрос, потому что многие работы содержат ограничения, которые не адаптированы к сложности многих объектов производственной системы. Хотя исследования в области задачи компоновки ведутся давно, тем не менее, они по-прежнему необходимы.

С точки зрения методов, используемых для решения задачи компоновки, очевидно, что использование метаэвристики получило большое распространение в работах для решения задач большего размера и учета ограничений. Эволюционные алгоритмы являются одним из самых распространенных подходов. Методы решения комбинируются для решения более сложных задач или обеспечения большей точности решения (например, объединение эволюционных принципов с имитационным моделированием). Учитывая тот факт, что трудно получить решение задачи, не используя экспертные знания о проектируемой системе, то существует необходимость в комбинированных методах оптимизации компоновки с учетом имеющихся экспертных знаний. Однако, подходы, основанные на искусственном интеллекте, мало рассматриваются в литературе.

Большинство рассмотренных работ сосредоточено на промышленных производствах. Однако задача компоновки также имеет место в других областях, например, радиоэлектронике, градостроительстве.

Коммерческие программные средства проектирования производства в настоящее время имеют ряд основных недостатков. Во-первых, сложность адаптации под российские стандарты и нормы проектирования. Во-вторых, в данных системах производится проверка только на наличие коллизий в полученном проекте. В-третьих, отсутствуют механизмы учета дополнительных ограничений. В-четвертых, большинство систем автоматизированного проектирования имеют узкую направленность на решение задачи компоновки только для некоторого класса промышленных объектов, без возможности адаптации под решение задачи компоновки для других классов объектов.

Исходя из анализа существующих подходов к решению задачи компоновки, сформулирована задача исследования: разработать подход к моделированию компоновки промышленных объектов, позволяющий гибко задавать и учитывать при решении задач компоновки ограничения на основе экспертной информации.

Глава 2 Математическая модель компоновки промышленных объектов

Содержательная постановка задачи компоновки промышленных объектов имеет следующий вид:

Необходимо определить пространственное расположение технологического оборудования в заданном пространстве такое, что значение выбранного критерия оптимальности будет достигать экстремума при выполнении системы физических, технологических и других ограничений, накладываемых на получаемое решение особенностями производств, отраслевыми стандартами, требованиями охраны труда и другими требованиями к решению, а также требованием обеспечения заданной системы технологических соединений.

Примем допущения:

1. Рассматриваются задачи компоновки химических и машиностроительных предприятий.
2. Объекты имеют одинаковую природу (набор свойств). При различном наборе свойств объектов будем считать, что для всех объектов этот набор одинаков и включает в себя все возможные свойства. Тогда, если объект не имеет какого-либо свойства, примем его неопределенным.
3. Объекты аппроксимируются прямоугольными параллелепипедами.
4. Технологические соединения проводятся параллельно осям координат.
5. Технологические соединения аппроксимируются цилиндрами.
6. Компоновка производится в готовых промышленных строениях, задача выбора строительных конструкций не рассматривается.

Зададим математическую постановку задачи оптимальной компоновки промышленных объектов. Для этого определим обобщенную структуру математической модели компоновки, включающую: описание объектов компоновки с учетом их параметров, систему технологических соединений и систему ограничений математической модели.

2.1 Математическое моделирование структуры технической системы

Для формализации постановки задачи и формирования системы ограничений математической модели будем использовать обобщенную структуру математической модели, основанную на применении N-ориентированных гиперграфов с ограничениями на свойства вершин и ребер:

$$G(X, U, U^L), \quad (2.1)$$

где $X = \{x_i \mid i = \overline{1, N_o}\}$ - множество вершин гиперграфа, x_i - i -тая вершина; $U = \{u_m(X'_m) \mid m = \overline{1, M}\}$ - множество гиперребер гиперграфа; $u_m(X'_m)$ - m -тое ребро гиперграфа; X'_m - множество вершин инцидентных m -тому ребру $X'_m \subseteq X$; $X'_m = \{x_k^{\bar{V}}\}$, $\forall k \in K_m$, $K_m \subseteq \overline{1, I}$, \bar{V} - номер вершины в ребре ориентированного гиперграфа представляет собой вектор, $\bar{V} = \{v_n \mid n = \overline{1, N}\}$. В общем случае номер вершины в ребре отражает определенное свойство вершины, которое принимает конкретное значение. [19] $U^L = \{u_l = \langle x_{p1}; x_{p2} \rangle_l \mid l = \overline{1, N_l}\}$ - множество ребер, задающее систему связей между объектами, ориентированного подграфа

$$G_l(X^L, U^L), \quad (2.2)$$

где $X^L \subset X$ - подмножество связанных вершин; N_l - количество связей; $\langle x_{p1}; x_{p2} \rangle_l$ - пара вершин, инцидентных l -ому ребру. Матрица инцидентности подграфа имеет вид $L = \{l_{p1, p2}\}$,

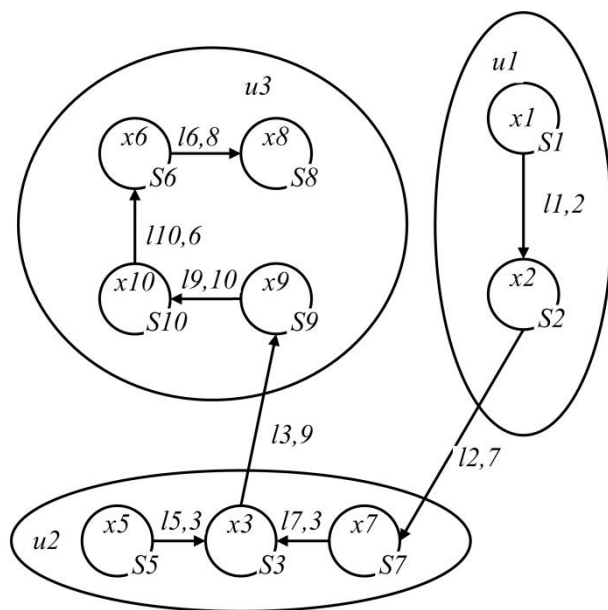
$$\text{где } l_{p1, p2} = \begin{cases} 0, & \text{если вершина } p1 \text{ не принадлежит ребру } p2, \\ -1, & \text{если вершина } p1 \text{ является началом ребра } p2, \\ 1, & \text{если вершина } p1 \text{ является концом ребра } p2. \end{cases} \quad (2.3)$$

Графически N-ориентированный гиперграф представлен на рисунке 2.1.

Рассмотрим $S = \{s_j \mid j = \overline{1, J}\}$ - множество всех возможных свойств вершин и ребер, $SX_i = \{s_j \mid j \in J1_i \subset \overline{1, J}\} \subset S$ - множество свойств i -той вершины, $SU_m = \{s_j \mid j \in J2_m \subset \overline{1, J}\} \subset S$ - множество свойств m -того ребра. Таким образом,

множество номеров каждой вершины $\bar{V} = \{v_n | n = \overline{1, N}\}$ заменяется множеством свойств SX_i , $i = \overline{1, I}$, аналогично каждому ребру $u_m(X1_m)$ сопоставляется набор свойств SU_m , $m = \overline{1, M}$.

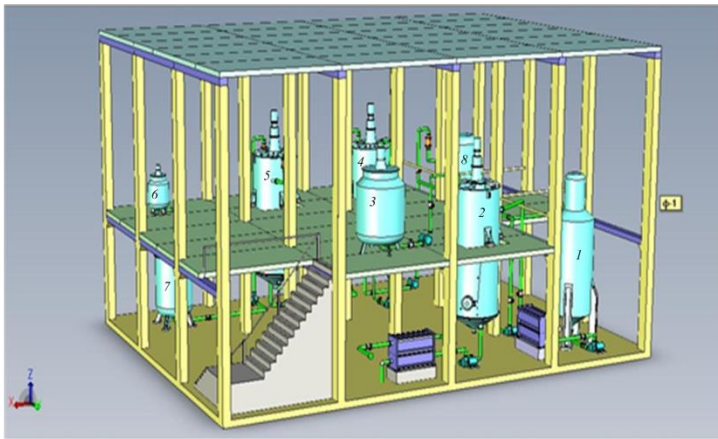
Ребрам подграфа $G_l(X^L, U^L)$ так же, как и ребрам гиперграфа $G(X, U, U^L)$ поставим в соответствие свой набор свойств $SU_l^L = \{s_j | j \in J3_l \subset \overline{1, J}\} \subset S, l = \overline{1, N_l}$.



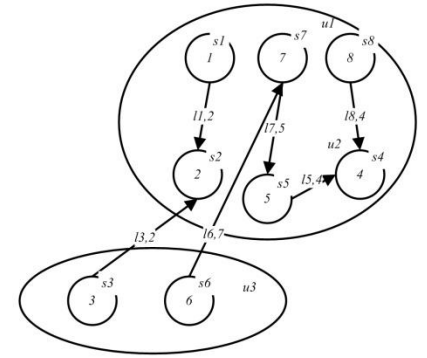
$x_1..x_{10}$ – вершины гиперграфа;
 $u_1..u_{10}$ – ребра гиперграфа;
 $S_1..S_{10}$ – множества свойств вершин;

Рисунок 2.1 – N-ориентированный гиперграф

Перейдем от проектируемой системы к N-ориентированному гиперграфу. Зададим множество размещаемого оборудования как множество вершин X гиперграфа (2.1). Через множество ребер U определим пространство компоновки (этажи, помещения, цеха). Систему технологических связей между оборудованием зададим в виде ориентированных ребер U^L подграфа (2.2), описанного матрицей инцидентности L . Таким образом, N-ориентированный гиперграф описывает структуру проектируемой технической системы (рисунок 2.2).



А)



Б)

Рисунок 2.2 – Пример описания технической системы с помощью N-ориентированного гиперграфа

А) 3D-модель системы; Б) Описание с помощью гиперграфа

Зададим множество свойств размещаемых объектов как множество свойств вершин гиперграфа. Аналогично свойства областей размещения определим через свойства ребер, а свойства технологических соединений через свойства ребер подграфа. Тогда $z[s_j, x_i] \in Z_j$ - значение свойства s_j объекта x_i . Значение свойства s_j области u_m обозначим $z[s_j, u_m] \in Z_j$. Рассмотрим элементарное ограничение свойства объекта, области размещения или технологического соединения в виде записи $z[s_j, x_i] \Theta z_{j,i,t}$, где Θ - логический оператор, заданный как элемент множества $\Omega = \{=, \neq, <, >, \leq, \geq\}$, $\Theta \in \Omega$. То есть, значение свойства s_j объекта x_i ограничивается с отношением Θ значением $z_{j,i,t}$. При этом, $z_{j,i,t}$ может быть как конкретным значением свойства, так и значением свойства другой вершины. По аналогии элементарное ограничение свойства ребра имеет вид $z[s_j, u_m] \Theta z_{j,m,t}$. Также зададим элементарное ограничение свойства ребра подграфа, как $z[s_j, u_l'] \Theta z_{j,l,t}$

В реальных задачах зачастую ограничивается не значение свойства, а некая функция от свойств объектов. Например, разница высоты расположения двух аппаратов, вещество между которыми передается самотеком. Тогда запишем

ограничение вершины как $f(z[s_j, x_i]) \Theta_{z_i}, \forall i = \overline{1, N_0}, j \in J1 \subset J$. Функция f является линейной функцией от значений свойств. Аналогично запишем ограничение ребер гиперграфа $f(z[s_j, u_m]) \Theta_{z_i}, \forall m = \overline{1, M}, j \in J2 \subset J$. Ограничение свойства ребра подграфа примет вид $f(z[s_j, u_l]) \Theta_{z_i}, \forall l = \overline{1, N_l}, j \in J3 \subset J$.

В соответствии с введенными обозначениями определим основные свойства объекта:

1. Геометрические размеры:

- а) длина $a_i = z[s_1, x_i]$;
- б) ширина $b_i = z[s_b, x_i]$;
- в) высота $h_i = z[s_h, x_i]$.

2. Параметры местоположения:

- а) вдоль оси x $K_{x,i} = z[s_x, x_i]$;
- б) вдоль оси y $K_{y,i} = z[s_y, x_i]$;
- в) вдоль оси z $K_{z,i} = z[s_z, x_i]$;
- г) угол поворота $K_{\alpha,i} = z[s_\alpha, x_i]$.

Определим основные свойства области размещения в соответствии с введенными обозначениями:

1. Геометрические размеры:

- а) длина $a = z[s_a, u_m]$;
- б) ширина $b = z[s_b, u_m]$;
- в) высота $h = z[s_h, u_m]$.

Эти свойства составляют обязательный, но не исчерпывающий список свойств вершин и ребер. Они позволяют однозначно определить пространственное размещение объектов. Таким образом, значения свойств $K_{x,i}, K_{y,i}, K_{z,i}, K_{\alpha,i}$ являются варьируемыми переменными в задаче компоновки.

Зададим геометрическое место объекта как множество точек входящих в аппроксимирующий объект параллелепипед O_i^x . Зададим это множество через свойства вершин

$$O_i^x = \{x_i, y_i, z_i\}, \text{ при } \begin{cases} x_i - \frac{1}{2}a_i \leq x_i \leq x_i + \frac{1}{2}a_i \\ y_i - \frac{1}{2}b_i \leq y_i \leq y_i + \frac{1}{2}b_i, \\ z_i - \frac{1}{2}h_i \leq z_i \leq z_i + \frac{1}{2}h_i \end{cases} \quad (2.4)$$

где i - номер вершины.

Аналогично зададим множество точек O_m^u , входящих в область размещения. Геометрически оно ограничено прямоугольным параллелепипедом, задающим некоторое монтажное пространство (например, помещение). Зададим это множество через свойства вершин

$$O_m^u = \{x_m, y_m, z_m\}, \text{ при } \begin{cases} x_m - \frac{1}{2}a_m \leq x_m \leq x_m + \frac{1}{2}a_m \\ y_m - \frac{1}{2}b_m \leq y_m \leq y_m + \frac{1}{2}b_m, \\ z_m - \frac{1}{2}h_m \leq z_m \leq z_m + \frac{1}{2}h_m \end{cases} \quad (2.5)$$

где m - номер вершины.

Рассмотрим возможные свойства технологических соединений. Для определения пространственного расположения технологического соединения будем использовать координаты точек изменения направления $Tr_l = \{< x_{l,i}, y_{l,i}, z_{l,i} >\}, l = \overline{1, N_l}, i = \overline{1, N_{нов,i}}$, где $N_{нов,i}$ количество точек изменения направления i -го соединения.

Также основными свойствами технологических соединений являются:

1. Тип соединения.
2. Тип транспорта веществ.
3. Предельное давление в трубе.
4. Стоимость единицы длины соединения.
5. Диаметр трубы (для технологических трубопроводов).

6. Сопротивление (для электрических линий).

Свойства объектов, областей размещения и технологических соединений разделим на следующие группы [19]:

1) свойства объекта, не зависящие от его размещения в соответствующей области (масса аппарата, размеры);

2) свойства области, не зависящие от размещенных в ней объектов (номер этажа, размеры помещения);

3) свойства технологических соединений, не зависящие от свойств соединяемых объектов;

4) свойства области, зависящие от размещенных в ней объектах (категория помещения определяется свойствами аппаратов, размещенных в нем);

5) свойства объекта, зависящие от его размещения в соответствующей области (координаты аппарата в конкретном помещении);

6) свойства объекта, зависящие от собственных свойств или свойств других объектов (при размещении однотипных аппаратов в ряд, после установки первого аппарата определена одна из координат (x или y) всех остальных аппаратов ряда);

7) свойства области, зависящие от собственных свойств, или свойств других областей;

8) свойства объекта, зависящие от свойств технологического соединения.

Свойства первой, второй и третьей группы являются исходными данными и вводятся до начала процесса размещения. Свойства четвертой, пятой, шестой, седьмой и восьмой группы определяются в процессе размещения. Задавая некоторые свойства объектов из этой группы до решения задачи и фиксируя их значение, можно перейти от общей задачи компоновки промышленных объектов к задаче компоновки при модернизации промышленного объекта.

Приведенная классификация необходима для классификации правил компоновки в зависимости от взаимного влияния свойств объектов, областей размещения и технологических соединений. Это необходимо для формализации метода формирования и контроля ограничений.

Теперь определим правила построения комбинации ограничений:

- объединение нескольких свойств одного объекта логическими операциями;
- объединение нескольких свойств одной области логическими операциями;
- объединение группы свойств группы различных объектов логическими операциями;
- объединение группы свойств группы областей размещения логическими операциями;
- объединение нескольких свойств одного технологического соединения логическими операциями.

Зададим логическую операцию γ как элемент множества $\Gamma = \{\wedge, \vee\}$. Использование только операций конъюнкции и дизъюнкции достаточно, так как любую другую логическую функцию можно выразить через операции конъюнкции, дизъюнкции и отрицания. Таким образом, ограничения задаются в базисе "И, ИЛИ, НЕ". Операция отрицания не включена в множество Γ , так как выражается через замену операции Θ на противоположную.

Введем функцию $F_1(z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R})$, соединяющую логическими операциями несколько ограничений свойств одного объекта:

$$F_1(z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R}) = (z[s_{j_1}, x_i] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma^1 \dots \gamma^r (z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r}), j_r \in J1 \subset J \quad (2.6)$$

где $J1$ - множество номеров свойств, соединяемых ограничений;

$t_r = \overline{1, T}$ - номер значения свойства s_{j_r} в ограничении r .

Рассмотрим пример объединения двух ограничений свойств объекта – "тяжелый аппарат емкостного типа". Для последующей записи в виде свойств вершины гиперграфа (2.1) запишем эти ограничения в виде "свойство объекта масса больше 5000 И свойство объекта тип равно емкостной".

Пусть для свойств "масса" $j_1=10$, "тип" $j_2=11$, тогда в выражении (2.1) $J_1 = \{10, 11\}$, $R_1 = 2$, Θ_1 соответствует знаку равно, а Θ_2 соответствует знаку больше. Таким образом, для рассматриваемого примера

$$F_1() = (z[s_{10}, x_{i1}] > 5000) \text{ И } (z[s_{11}, x_{i1}] = \text{"емкостной"}), i1 \in I \quad (2.7)$$

По аналогии с $F_1()$ введем функцию $F_2(z[s_{j_r}, u_m] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R})$, соединяющую логическими операциями несколько ограничений свойств одной области размещения:

$$F_2(z[s_{j_r}, u_m] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R}) = (z[s_{j_1}, u_m] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma_1 \dots \dots \gamma_r (z[s_{j_r}, u_m] \Theta_r z_{j_r, t_r}), j_r \in J_2 \subset J \quad (2.8)$$

где J_2 - множество номеров свойств, соединяемых ограничений.

Введем функцию $F_3(F_1(z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R}))$, соединяющую логическими операциями группы ограничений свойств разных объектов:

$$\begin{aligned} F_3(F_1()) &= F_1^{1,r}() \gamma_1 \dots \gamma_i F_1^{i,r}(), = \\ &= [(z[s_{j_1}, x_{1,r}] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma^1 \dots \gamma^r (z[s_{j_r}, x_{1,r}] \Theta_r z_{j_r, t_r})] \gamma_{1,r} \dots \dots \gamma_{i,r} [(z[s_{j_1}, x_{i,r}] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma^1 \dots \gamma^r (z[s_{j_r}, x_{i,r}] \Theta_r z_{j_r, t_r})], \\ & j_r \in J_{i_r} \subset J, \forall i \in I_r \end{aligned} \quad (2.9)$$

где I_r - множество номеров соединяемых объектов;

J_{i_r} - множество номеров соединяемых свойств объекта i_r ;

R_{i_r} - количество соединяемых ограничений свойств объекта i_r .

Например, если среда в одном аппарате взрывоопасна, а другой работает при высоких температурах и свойству взрывоопасность соответствует $j_1=10$, а свойству температура в аппарате $j_2=11$, $R_{i_1} = 1$, $R_{i_2} = 1$ выражение (2.4) примет вид

$$F_3(F_1()) = (z[s_{10}, x_{i1}] = \text{"Да"}) \text{ И } (z[s_{11}, x_{i2}] > 300), i1 \neq i2, i1, i2 \in I_1 \subset I. \quad (2.10)$$

По аналогии с $F_3(F_1())$ введем функцию $F_4(F_2())$, которая объединяет логическими операциями группы ограничений свойств разных областей размещения:

$$\begin{aligned}
 F_4(F_2()) &= F_{2,r}^1() \gamma_1 \dots \gamma_{m,r} F_2^{m,r}(), = \\
 &= [(z[s_{j_1}, u_{1,r}] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma^1 \dots \gamma^r (z[s_{j_r}, u_{1,r}] \Theta_r z_{j_r, t_r})] \gamma_{1,r} \dots \\
 &\gamma_{m,r} [(z[s_{j_1}, u_{m,r}] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma^1 \dots \gamma^r (z[s_{j_r}, u_{m,r}] \Theta_r z_{j_r, t_r})], \\
 &j_r \in J_{m_r} \subset J, \forall m_r \in M_r
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

где M_r - множество номеров соединяемых областей;

J_{m_r} - множество номеров соединяемых свойств области m_r ;

$R_{m,r}$ - количество соединяемых ограничений свойств области m_r .

По аналогии с комбинацией ограничений свойств области размещения зададим функцию $F_5(z[s_{j_r}, u_l'] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R})$, объединяющую логическими операциями несколько ограничений свойств технологических соединений:

$$\begin{aligned}
 F_5(z[s_{j_r}, u_l'] \Theta_r z_{j_r, t_r} | r = \overline{1, R}) &= (z[s_{j_1}, u_l'] \Theta_1 z_{j_1, t_1}) \gamma_1 \dots \\
 &\dots \gamma_r (z[s_{j_r}, u_l'] \Theta_r z_{j_r, t_r}), j_r \in J3 \subset J
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

где $J3$ - множество номеров свойств соединяемых ограничений.

2.2 Система ограничений математической модели

Окончательное проектное решение по компоновке зависит от системы ограничений математической модели. Они сужают множество допустимых вариантов решения, что упрощает поиск оптимального решения среди них, с одной стороны. С другой стороны, же усложняется учет ограничений. Ограничения и правила могут быть вызваны требованиями разнообразных ведомственных инструкций и нормативов, правил по технике безопасности, ремонту и обслуживанию оборудования, а также конструкционными и технологическими ограничениями. Также правила и ограничения могут вводиться

конструктором на основании собственного опыта. Основной задачей здесь является предусмотреть весь набор ограничений различного характера. Другим выходом является гибкое задание ограничений.

Рассмотрим правило вида «Если А, то В», в котором А и В некоторые события. Будем называть событие А условной частью правила, а событие В следствием. Событие А и В представляют собой комбинацию ограничений вершин и ребер гиперграфа (2.1) и подграфа(2.2), то есть свойств объектов компоновки. Тогда будем считать системой ограничений математической модели систему правил:

$$\begin{aligned}
 & [\text{Если } F^{1,r} () \gamma_1 \dots \gamma_i F^{i,r} (), \text{ то } F^{1,r} () \gamma_1 \dots \gamma_j F^{j,r} ()]_k \\
 & \text{или} \\
 & [F^{1,r} () \gamma_1 \dots \gamma_i F^{i,r} () \Rightarrow F^{1,r} () \gamma_1 \dots \gamma_j F^{j,r} ()]_k, \\
 & \text{при } k = \overline{1, K}, r = \overline{1, 5}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

где $F^{i,r} ()$, $F^{j,r} ()$ - функция вида $F_1 () \dots F_5 ()$, r - вид функции.

Таким образом, допустимым является вариант решения, для которого выполняются приведенная выше система ограничений математической модели.

Рассмотрим основные ограничения математической модели компоновки промышленных объектов. Некоторые из этих ограничений являются обязательными для любой задачи компоновки. Например, условие непересечения объектов, условие размещения внутри заданной области.

1. Условие непересечения размещаемых объектов. В содержательном виде звучит следующим образом: размещаемые объекты не должны пересекаться. Формализованное ограничение в виде (2.13) будет записано следующим образом:

$$\text{Если } O_i^x \cup O_k^x = \emptyset, \text{ то } O_j^x = O_k^x, \forall i \neq j, \tag{2.14}$$

где O_k^x - некоторая область, в которой планируется размещение объекта x_j .

2. Условие размещения внутри заданной области. В содержательном виде звучит следующим образом: объект должен быть размещен внутри

заданного пространства. В формализованном виде ограничение будет записано следующим образом:

$$\text{Если } O_k^x \in O_m^u, \text{ то } O_j^x = O_k^x, \quad (2.15)$$

где O_k^x - некоторая область, в которой планируется размещение объекта x_j .

3. Ограничение на максимальный размер объекта. В содержательном виде звучит следующим образом: Геометрические размеры объекта не могут быть больше допустимых. В виде (2.13) будет записано как:

$$\begin{aligned} \text{Если } z[a, x_i] > a_{\max} \text{ ИЛИ } z[b, x_i] > b_{\max} \text{ ИЛИ } z[h, x_i] > h_{\max}, \\ \text{то } x_i \notin X'_m \end{aligned}, \quad (2.16)$$

где X'_m - множество вершин, которые могут принадлежать ребру u_m или множество объектов, которые можно разместить в области m .

4. Ограничение на размещение объектов по этажам. Например, тяжелые объекты размещаются на нижних этажах. В содержательном виде звучит следующим образом: Если масса объекта больше заданного значения, то его можно располагать не выше первого.

$$\text{Если } z[s_k, x_i] > s_{k,t1} \text{ И } z[s_j, u_m] \leq 1, \text{ то } x_i \in X'_m \quad (2.17)$$

5. Условие группировки объектов по типу. В содержательном виде звучит следующим образом: Однотипные объекты следует располагать в одной области. Это позволяет упростить обслуживание объектов, а также обеспечить взаимозаменяемость. Также это требование трактуется технологией производства. Например, использованием единого сырья, доставляемого по одной транспортной линии. В формализованном виде ограничение будет записано следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Если } z[s_k, x_{i1}] = s_{k,t1} \text{ И } z[s_k, x_{i2}] = s_{k,t1} \text{ И } x_{i1} \in X'_m, \\ \text{то } x_{i2} \in X'_m \forall i1 \neq i2 \end{aligned} \quad (2.18)$$

6. Ограничение размещения объектов по типу объекта и типу области. В содержательном виде звучит следующим образом: Объекты некоторого типа следует располагать в области заданного типа. Например, аппараты,

перерабатывающие токсичные вещества, следует располагать в помещениях с усиленной вентиляцией.

$$\text{Если } z[s_k, x_i] = s_{k,t1} \text{ И } z[s_j, u_m] = s_{j,t2}, \text{ то } x_i \in X'_m \forall i = \overline{1, N} \quad (2.19)$$

7. Ограничение минимального расстояния между объектами. В содержательном виде звучит следующим образом: Расстояние между размещаемыми объектами должно быть не менее заданного.

$$\begin{aligned} &\text{Если } x_i \in X_m \text{ И } x_j \in X_m, \\ &\text{то } |z[s_1, x_i] - z[s_1, x_j]| + |z[s_2, x_i] - z[s_2, x_j]| + |z[s_3, x_i] - z[s_3, x_j]| \geq S_{i,j}^{\min} \end{aligned} \quad (2.20)$$

2.3 Классификация правил компоновки

Приведем классификацию правил компоновки в зависимости от взаимного влияния свойств объектов и областей размещения (Рис. 2.3).

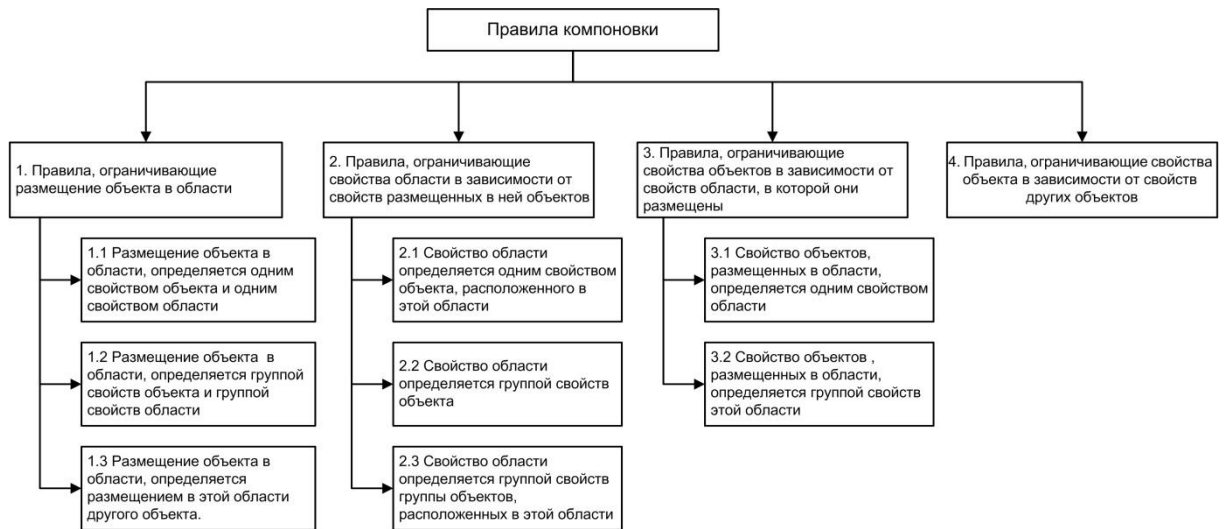


Рисунок 2.3 – Классификация правил компоновки

Данная классификация формализует задание ограничений и упрощает впоследствии их учет с помощью методов экспертных систем. Рассмотрим подробнее приведенную классификацию.

1. Правила, ограничивающие размещение объекта в области.

Правила, которые определяют размещение объекта в области можно разделить на три группы:

- размещение объекта в области определяется одним свойством объекта и одним свойством области;
- размещение объекта в области определяется группой свойств объекта и группой свойств области;
- размещение одного объекта в области определяется размещением в данной области другого объекта.

1.1 Размещение объекта x_i в области u_m , $x_i \in X'_m$ определяется одним свойством s_{j_1} объекта x_i и свойством s_{j_2} области u_m . Представляет собой правило: Если значение свойства s_{j_1} объекта x_i ограничено заданным значением, то объект может быть размещен в области u_m со значением свойства s_{j_2} ограниченным заданным. В математической форме это правило примет следующий вид:

$$z[s_{j_1}, x_i] \Theta_1 z_{j_1, t_1} \wedge z[s_{j_2}, u_m] \Theta_2 z_{j_2, t_2} \Rightarrow x_i \in X'_m \quad (2.21)$$

1.2 Размещение объекта x_i в области u_m , $x_i \in X'_m$ определяется группой свойств объекта $\{s_{j_{r_1}}\} \subset S, j_{r_1} \in J1 \subset J$, соединенных логическими условиями "И,ИЛИ" и группой свойств области $\{s_{j_{r_2}}\} \subset S, j_{r_2} \in J2 \subset J$, соединенных логическими условиями "И,ИЛИ".

Представляет собой правило: Если значения группы свойств $\{s_{j_{r_1}}\} \subset S, j_{r_1} \in J1 \subset J$ объекта x_i ограничены заданными значениями, то вершина может быть размещена в области u_m со значениями группы свойств $\{s_{j_{r_2}}\} \subset S, j_{r_2} \in J2 \subset J$ ограниченными заданными. В математической форме это правило примет следующий вид:

$$F_1(z[s_{j_{r_1}}, x_i] \Theta_{r_1} z_{j_{r_1}, t_{r_1}}) \wedge F_1(z[s_{j_{r_2}}, u_m] \Theta_{r_2} z_{j_{r_2}, t_{r_2}}) \Rightarrow x_i \in X'_m \quad (2.22)$$

1.3 Размещение объекта x_i в области u_m , $x_{i_1} \in X'_m$ определяется размещением в этой области другого объекта x_{i_2} , $x_{i_2} \in X'_m$. Объект x_{i_1} обладает свойствами $\{s_{j_{r_1}}\} \subset S, j_{r_1} \in J1 \subset J$, объект x_{i_2} - свойствами $\{s_{j_{r_2}}\} \subset S, j_{r_2} \in J2 \subset J$, которые

объединяются функцией $F_1()$ вида (2.7). Пример ограничения: "Сушильные установки необходимо располагать в одном помещении". В виде продукционного правила ограничение будет записано следующим образом: «Если тип объекта сушильная установка и объект размещен в помещении u_m и тип размещаемого объекта сушильная установка, то его следует размещать в помещении u_m ».

$$F_1(z[s_{j_{r1}}, x_{i1}] \Theta_{r1} z_{j_{r1}, t_{r1}}) \wedge F_1(z[s_{j_{r2}}, x_{i2}] \Theta_{r2} z_{j_{r2}, t_{r2}}) \wedge \wedge (x_{i2} \in X'_m) \Rightarrow x_{i1} \in X'_m, \quad (2.23)$$

2. Правила, ограничивающие свойства области в зависимости от свойств, размещенных в ней объектов.

Это правила, позволяющие по известным определенным свойствам объекта x_i , расположенного в области u_m , определить свойства этой области.

Рассмотрим следующие группы правил определяющих свойства области в зависимости от свойств объектов:

2.1 Свойство s_{j_2} области u_m определяется одним свойством s_{j_1} объекта x_i , расположенного в этой области $x_i \in X'_m$. Правило имеет вид: Если значение свойства s_{j_1} объекта x_i , расположенного в области u_m , ограничено заданным значением, то свойство s_{j_2} этой области ограничено заданным значением. Или:

$$z[s_{j_1}, x_i] \Theta z_{j_1, t_1} \wedge x_i \in X'_m \Rightarrow z[s_{j_2}, u_m] = z_{j_2, t_2} \quad (2.24)$$

2.2 Свойство s_{j_2} области u_m определяется группой свойств $\{s_{j_r}\} \subset S, j_r \in J_1 \subset J$ объекта x_i . Правило имеет вид: Если значения группы свойств $\{s_{j_r}\} \subset S, j_r \in J_1 \subset J$ объекта x_i , расположенного в области u_m , ограничены заданными значениями, то свойство s_{j_2} этой области ограничено заданным значением. Или:

$$F_1(z[s_{j_r}, x_i] \Theta_r z_{j_r, t_r}) \wedge x_i \in X'_m \Rightarrow z[s_{j_2}, u_m] = z_{j_2, t_2}. \quad (2.25)$$

2.3 Свойство s_{j_2} области u_m определяется группой свойств $\{s_{j_{r_1}}\} \subset S, j_{r_1} \in J1 \subset J$ группы объектов $X1 = \{x_{i_{r_1}}\}, i_{r_1} \in I1 \subset I$, расположенных в этой области (т.е. свойства могут принадлежать разным объектам в области)

$$F_3(F_1()) = \bigwedge_{\forall i_{r_1} \in I1} [F_1^{i_{r_1}}(z[s_{j_{r_1}}, x_{i_{r_1}}] \Theta_{r_1} z_{j_{r_1}, t_{r_1}})] \wedge \bigwedge_{\forall i_{r_1} \in I1} [x_{i_{r_1}} \in X'_m] \Rightarrow z[s_{j_2}, u_m] = z_{j_2, t_2} \quad (2.26)$$

3. Правила, ограничивающие свойства объектов в зависимости от свойств области, в которой они размещены.

Далее рассмотрены правила, позволяющие определять свойства объектов $x_{i_1} \in X_m$, размещенных в области u_{m_1} , по свойствам этой области.

3.1 Свойство s_{j_1} объектов $x_i \in X'_m$, размещенных в области u_m , определяется одним свойством области s_{j_2} .

$$z[s_{j_2}, u_m] \Theta z_{j_2, t_2} \wedge x_i \in X'_m \Rightarrow z[s_{j_1}, x_i] = z_{j_1, t_1}, \quad (2.27)$$

3.2 Свойство s_{j_1} объектов $x_i \in X'_m$, размещенных в области u_m , определяется группой свойств $\{s_{j_r}\} \subset S, j_r \in J2 \subset J$ этой области.

$$F_2(z[s_{j_r}, u_m] \Theta_r z_{j_r, t_r}) \wedge x_i \in X'_m \Rightarrow z[s_{j_1}, x_i] = z_{j_1, t_1} \quad (2.28)$$

4. Правила, ограничивающие свойства объекта в зависимости от свойств других объектов.

Правила, определяющие значение свойства j_3 одного объекта x_{i_3} по известным свойствам $\{s_{j_{r_1}}\} \subset S, j_{r_1} \in J1 \subset J$ другого объекта x_{i_1} , размещенного в той же области $x_{i_1}, x_{i_3} \in X'_m$, или по другим свойствам того же объекта.

$$F_1(z[s_{j_{r_1}}, x_{i_1}] \Theta_{r_1} z_{j_{r_1}, t_{r_1}}) \wedge x_{i_1} \in X'_m \wedge x_{i_3} \in X'_m \Rightarrow z[s_{j_3}, x_{i_3}] = z_{j_3, t_3}, \quad (2.29)$$

если $i_3 = i_1, j_3 \notin J1$.

2.4 Выбор критерия оптимальной компоновки

В качестве критерия оптимальности проектного решения по компоновке промышленных объектов будем рассматривать функцию от значений свойств объектов (2.30).

$$R(z[s_{j_1}, x_i], z[s_{j_2}, u_m], z[s_{j_3}, u_l]) \quad (2.30)$$

Так как не рассматривается решение конкретной задачи, то критерий определяем в общем виде. В качестве критерия в зависимости от постановки задачи может быть использован критерий минимума общей стоимости технологических соединений, критерий минимума занимаемой площади, комплексный критерий приведенных затрат, включающий в себя капитальные и эксплуатационные затраты.

С использованием N-ориентированных гиперграфов запись критерия суммарного расстояния примет вид:

$$R_L = \sum \left[(|z[s_x, x_i] - z[s_x, x_j]| + |z[s_y, x_i] - z[s_y, x_j]| + |z[s_z, x_i] - z[s_z, x_j]|) \cdot k \right], \forall i, j | l_{i,j} = k \quad (2.31)$$

Критерий оптимальной компоновки по площади тогда примет вид:

$$R_S = \max(z[s_x, x_i] + z[s_a, x_i] / 2) \cdot \max(z[s_y, x_i] + z[s_b, x_i] / 2) \cdot \max(z[s_y, x_i] + z[s_h, x_i] / 2) \quad (2.32)$$

Критерий суммарной длины связи будет иметь вид:

$$R_L^S = \sum_{i=1}^{N_o} \sum_{j=1}^{N_o} (l_{i,j} * L_{i,j}^t), \forall i, j | l_{i,j} = k, \quad (2.33)$$

где $L_{i,j}^t$ - длина соединения между вершинами i, j .

Зачастую этого достаточно для оценки качества решения, но в реальных проектах имеется потребность в иной оценке оптимальности. Более точным и полным критерием является экономический критерий, отражающий стоимость проекта. Он включает в себя стоимость реализации проекта: стоимость

оборудования, стоимость его монтажа, стоимость технологических соединений и их монтажа, стоимость вспомогательного оборудования, стоимость трубопроводной арматуры, стоимость вспомогательных металлоконструкций, стоимость строительных конструкций. Также экономический критерий учитывает затраты на последующую эксплуатацию проектируемого объекта, в том числе затраты на обеспечение транспорта веществ, затраты на обслуживание объекта, затраты, обусловленные потерей тепловой энергии при транспортировке веществ.

$$R_{\Sigma} = R_C + R_3 \quad (2.34)$$

где R_C - стоимость реализации проекта;

R_3 - затраты на эксплуатацию объекта.

Рассмотрим подробнее составляющие критерия и их влияние на оптимальность решения.

Стоимость реализации проекта имеет наибольшее значение при определении оптимальности получаемого решения.

$$R_C = C_{обор.} + C_{соед} + C_{арм} + C_{мет} + C_{вс.об.} + C_{строит.} + C_{монт.об.} + C_{монт.соед.} \quad (2.35)$$

В данной работе рассматривается случай компоновки промышленных объектов в готовых производственных помещениях, поэтому стоимость строительных конструкций $C_{строит.}$ для всех возможных вариантов проектных решений будет одинакова и не будет зависеть от варианта размещения оборудования и трассировки трубопроводов. Для оценки решения этой величиной можно пренебречь. Будем учитывать стоимость строительных конструкций для общности модели.

В данной работе также не рассматривается задача выбора аппаратурного оформления технологической системы, поэтому набор оборудования одинаков для всех вариантов проектных решений. Таким образом, стоимость оборудования $C_{обор.}$ также не влияет на оптимальность получаемого решения.

Стоимость технологических соединений $C_{соед}$ зависит от длины каждого соединения $L_{i,j}^T$ и стоимости единицы длины соединения $C_{ед}^T$:

$$C_{соед} = \sum_i \sum_j (C_{ед}^T \cdot L_{i,j}^T \cdot l_{i,j}), i, j = \overline{1, N_O} \quad (2.36)$$

Стоимость вспомогательных металлоконструкций представляет собой суммарную стоимость каждой конструкции, которая будет зависеть от свойств оборудования, к которому она монтируется:

$$C_{мет} = \sum_i C_{мет,i} = \sum_i f(z[s_j, x_i] | j \in J1), \forall i = \overline{1, N_O} \quad (2.37)$$

Стоимость вспомогательного оборудования определяет суммарную стоимость всех насосов, компрессорных установок и прочего оборудования, служащего для функционирования транспортной системы объекта, и зависит от параметров системы технологических соединений:

$$C_{вс.об.} = \sum_l C_{вс.об.,l} = \sum_l f(z[s_j, u_l'] | j \in J3), \forall l = \overline{1, N_l} \quad (2.38)$$

Стоимость монтажа оборудования учитывает стоимость монтажа каждой единицы оборудования и стоимость монтажа вспомогательных металлоконструкций для него:

$$C_{монт.об.} = \sum_i (C_{монт.об.,i} + C_{монт.мет.,i}), i = \overline{1, N_O} \quad (2.39)$$

Стоимость монтажа технологических соединений учитывает стоимость монтажа каждого соединения, стоимость монтажа вспомогательного оборудования:

$$C_{монт.соед.} = \sum_l C_{монт.соед.,l} + C_{монт.всп.}, l = \overline{1, N_l} \quad (2.40)$$

Затраты на эксплуатацию объекта зависят от свойств оборудования, технологических соединений и требуют дополнительных гидродинамических, термодинамических и других специальных расчетов, которые не рассматриваются в данной работе. При оценке качества получаемого решения достаточно использование критерия стоимости реализации проекта.

Для различных вариантов задачи компоновки промышленных объектов необходимо использование различных критериев, которые не всегда возможно представить через стоимостное выражение реализации проекта. Оценка значений

различных критериев возможна при использовании библиотеки критериев. Библиотека критериев представляет собой набор функций для расчета различных критериев и функции обобщения критерия, представляющей собой сумму значений выбранных критериев с весовыми коэффициентами. Выбор ограничений внутри библиотеки осуществляется управляющим вектором, представляющим собой вектор весовых коэффициентов. Ненулевое значение коэффициента i -го компонента вектора, означает выбор i -й функции расчета критерия. Таким образом, задача компоновки промышленных объектов является многокритериальной задачей оптимизации, поэтому функция обобщения критерия может реализовывать любой из методов многокритериальной оптимизации, например, метод Парето.

2.5 Обобщенная математическая постановка задачи

С учетом приведенных выше обозначений постановку задачи оптимальной компоновки промышленных объектов можно выразить в следующем виде:

Найти вариант компоновки оборудования $K_{x,i} = z[s_1, x_i]$, $K_{y,i} = z[s_2, x_i]$, $K_{z,i} = z[s_3, x_i]$, $K_{\alpha,i} = z[s_4, x_i]$, $i = \overline{1, N_O}$, при которых критерий $R_C() \rightarrow \min$ будет минимальным, при выполнении системы ограничений:

$$[\text{Если } F^{1,r}() \gamma_1 \dots \gamma_i F^{i,r}(), \text{ то } F^{1,r}() \gamma_1 \dots \gamma_j F^{j,r}()]_k$$

или

$$[F^{1,r}() \gamma_1 \dots \gamma_i F^{i,r}() \Rightarrow F^{1,r}() \gamma_1 \dots \gamma_j F^{j,r}()]_k,$$

$$\text{при } k = \overline{1, K}, r = \overline{1, 5}$$

где $K_{x,i}, K_{y,i}, K_{z,i}$ - координаты i -го объекта;

$$K_{\alpha,i} = k \frac{\pi}{2}, k = 1, 2, 3, 4 - \text{угол поворота объекта вокруг вертикальной оси.}$$

Выводы к Главе 2:

1. Разработана обобщенная структура математической модели, основанная на применении N -ориентированных гиперграфов для моделирования структуры технической системы, а также на записи условий математической модели в виде продукционных правил.
2. Описан общий вид ограничений математической модели, позволяющий моделировать ограничения различной природы при помощи продукционных правил.
3. Приведена классификация правил компоновки в зависимости от влияния свойств объектов и областей размещения, что позволяет определить зависимость свойств объектов и свойств областей размещения, а также технологических соединений, и далее использовать приведенную классификацию при решении задачи.
4. С учетом разработанной обобщенной структуры математической модели сформулирована общая постановка задачи оптимальной компоновки промышленных объектов.

Глава 3 Метод формирования и контроля выполнения ограничений

Этап структурного синтеза в конструкторском проектировании промышленных объектов имеет большое значение, так как решения, принятые на этом этапе во многом определяют стоимость промышленного объекта и эффективность его эксплуатации впоследствии. Проектирование структуры промышленного объекта всегда связано с выполнением требований различных отраслевых стандартов, ведомственных инструкций и других требований различного характера. Например, по требованиям безопасности между аппаратами с высокой температурой среды в них и трубопроводами высокого давления должно выдерживаться минимально допустимое расстояние. Также целесообразно, с точки зрения взаимозаменяемости и удобства обслуживания оборудования, группировать однотипное оборудование. Другие ограничения связаны с конструктивными особенностями производственных помещений. Например, ограничение максимальной массы оборудования, располагаемого на верхних этажах, или ограничение максимальных габаритных размеров оборудования. Также возможно использование ограничений, основанных на опыте конструктора, которые позволяют, например, упростить монтаж оборудования при модернизации производства. Существует множество таких ограничений: конструкционные ограничения, технологические ограничения, ограничения, связанные с охраной труда, ограничения, связанные с удобством последующей эксплуатации объекта и т.д. Поэтому на стадии разработки математической модели для решения задачи компоновки промышленных объектов необходимо учесть весь набор ограничений, так как они напрямую влияют на качество получаемого решения. Однако, специфика предметной области для каждой конкретной практической задачи, а также возможность наложения дополнительных ограничений делает задачу учета всех ограничений нереализуемой на практике. Решением данной задачи является разработка метода

формирования и контроля системы ограничений. Необходимо разработать метод задания ограничений различного характера.

Примем допущение, ограничения, связанные с проведением дополнительных расчетов (гидродинамические, термодинамические и т.д.) рассматриваются в общем виде. Результат расчетов является неким отображением свойств вершин и ребер гиперграфа (2.1) и подграфа (2.2).

3.1 Процедура формирования ограничений

Рассмотрим ограничения математической модели (2.13). Все ограничения при компоновке промышленных объектов рассматриваются как правила вида «Если А, то В». Правила отражают зависимость свойств объектов, областей размещения и технологических соединений в соответствии с приведенной классификацией. При этом правила формируются на основе информации, полученной от эксперта в данной предметной области. Эксперт формирует представление о решаемой задаче в виде совокупности правил и данных. Данные в этом случае представляют собой значения свойств объектов. Правила являются ограничениями компоновки и определяют способы преобразования данных при решении задачи. На начальном этапе эта информация носит обобщенный, неструктурированный характер. Структурирование и запись правил в формализованном виде производит непосредственно разработчик проекта, который также может являться экспертом при решении задачи. Формализация правил и формирование системы ограничений производится в порядке, приведенном в данной процедуре.

Рассмотрим порядок формирования системы ограничений в формализованном виде (Рисунок 3.1). Данный подход одинаков для всех ограничений, кроме требующих проведения специальных расчетов. Задание таких ограничений имеет некоторые отличия, которые будут рассмотрены отдельно.

Для каждого ограничения математической модели решаемой задачи определяется тип в соответствии с приведенной классификацией. Например, ограничение «размещение однотипных аппаратов в одном помещении» относится к типу 1.3.

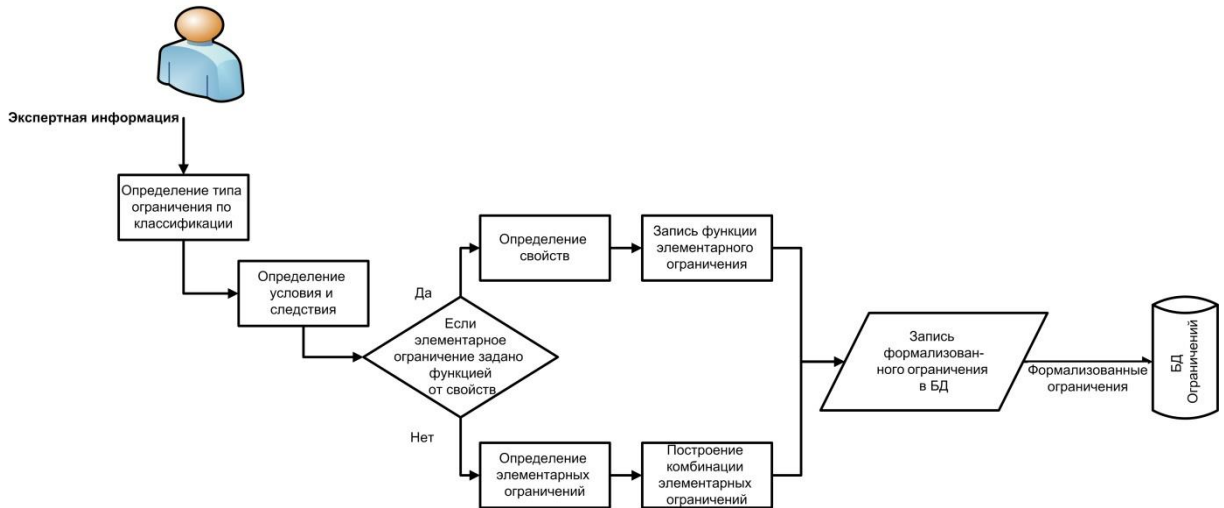


Рисунок 3.1 – Блок-схема процедуры формирования ограничений

Далее ограничение записывается в виде правила. Для этого определяется условие и следствие. В рассматриваемом примере условием будет являться следующее: «тип размещаемого аппарата равен типу уже размещенного в помещении». А следствием является «аппарат необходимо размещать в том же помещении». Так ограничение в виде правила будет записано следующим образом: «Если тип размещаемого аппарата равен типу уже размещенного в помещении, то аппарат необходимо размещать в том же помещении».

Затем выделяются элементарные ограничения, соответствующие условию и следствию. Если условие содержит комбинацию ограничений, то сначала выделяются элементарные ограничения, а затем строится их комбинация в виде (2.6,2.8,2.9,2.11,2.12). Пусть в данном примере для свойства «тип» его номер $j_1 = 5$, тогда условие примет вид $z[s_5, x_i] = z[s_5, x_j] \text{ И } x_j \in u_m$. Следствие соответственно $x_i \in u_m$.

После того, как формализованы условие и следствие правила оно записывается в виде «Если А, то В». В данном примере правило примет вид
Если $z[s_5, x_i] = z[s_5, x_j]$ И $x_j \in u_m$, то $x_i \in u_m$.

Описанная процедура проводится для каждого ограничения в решаемой задаче.

Для определения некоторых условий необходимы специальные расчеты. Например, гидродинамические расчеты для определения максимальной длины трубопровода. Тогда запишем ограничение в общем виде
Если $f(z_1, z_2, \dots, z_n) \Theta z_f$, то В,

где $f(z_1, z_2, \dots, z_n)$ - функция, зависящая от значений свойств вершин и ребер;

z_1, z_2, \dots, z_n - значения свойств;

z_f - ограничение значения функции.

Формирование ограничений в данном случае будет выполняться следующим образом. Ограничение также классифицируется по приведенной классификации. Далее аналогично выбирается условие и следствие правила. Затем выбираются свойства, от которых зависит значение рассчитываемого показателя. Для данного примера это количество точек изменения направления трубопровода, диаметр и давление на входе. Эти свойства являются переменными для функции расчета. Правило включается в систему, при этом, функция записывается как обращение к некоторой предопределенной функции.

Набор функций процедур (функций специализированного расчета) определяется заранее. Это сужает область применения данного подхода при решении задач на практике с применением ЭВМ. Но применение библиотек расчетов позволяет применять подход в различных предметных областях.

Совокупность всех правил, заданных в соответствии с приведенной процедурой в виде (2.13), составляет систему ограничений модели при решении задачи компоновки промышленных объектов.

Формализованное условие записывается в базу знаний в виде символьной строки, содержащей правило на формальном языке. Рассмотрим грамматику формального языка записи правил:

<правило>:= ЕСЛИ <условие> ТО <следствие>
 <условие>:=<выражение>
 <следствие>:=<выражение>
 <выражение>:=<логическая функция> {<логический оператор> <логическая функция>}
 <логический оператор>:=И / ИЛИ
 <логическая функция>:=<ограничение> {<логический оператор>
 <ограничение>}
 <ограничение>:=<функция> <оператор> <значение>
 <оператор>:=<|>|=|<=<=
 <значение>:=<свойство>/<константа>
 <функция>:=<функция свойства1>/<функция свойства2>
 <функция свойства1>:=<слагаемое> {+/- <слагаемое>}
 <слагаемое>:=<множитель> {*/ “/”<множитель>}
 <множитель>:=<свойство>/<константа>
 <функция свойства2>:=<имя>(<список параметров>)
 <список параметров>:=<свойство> {,<свойство>}
 <свойство>:=<свойство объекта>/<свойство области>/<свойство
 соединения>
 <свойство объекта>:=z[s(< номер >),x(< номер >)]
 <свойство области>:=z[s(< номер >),um(< номер >)]
 <свойство соединения>:=z[s(< номер >),ul(<номер>)]
 <номер>:=<число>
 <константа>:=<строка>/<число>

Данный язык позволяет записать ограничение в виде конструкции «ЕСЛИ ..., ТО ...». При этом данный язык имеет возможность записи простых математических выражений и обращений к функциям расчета.

3.2 Процедура контроля выполнения ограничений

Рассмотрим процесс проверки выполнения ограничений вида (2.13) при компоновке промышленных объектов.

Для контроля выполнения ограничений в процессе проектирования компоновки промышленных объектов применим механизмы экспертных систем. Ограничения в данной задаче обусловлены, во-первых, техническими, технологическими требованиями и требованиями стандартов, а также собственным опытом проектировщика, являющегося экспертом в данной предметной области. В зависимости от особенностей конкретной решаемой задачи набор ограничений может быть различен, а задание их с применением традиционных технологий программирования может быть затруднено необходимостью внесения изменений в исходный код программы разработчиком, либо использования сложных команд. То есть для получения решения с помощью таких систем кроме эксперта предметной области необходим специалист в области программирования. Использование же механизмов экспертных систем совместно с традиционными методами позволяет решить задачу гибкого формирования системы ограничений самим экспертом, так как правила в таком случае представляются в естественном виде.

Тогда, переходя на терминологию экспертных систем, свойства объектов и областей размещения представляют собой факты базы знаний, а ограничения, формализованные в виде правил «Если А, то В», то есть правил получения новых знаний.

Главной частью экспертной системы является механизм логического вывода. Его можно представить в виде четверки $\langle V, S, K, W \rangle$, где V – это

процедура выбора из базы знаний правил и фактов; S – процедура сопоставления правил и фактов, в результате которой определяется множество фактов к которым применимы правила для присвоения значений; K - процедура разрешения конфликтов, определяющая порядок использования правил, если в заключении правила указаны одинаковые имена фактов с разными значениями; W – процедура, осуществляющая выполнение действий, соответствующих полученному значению факта (заключению правила). Рассмотрим более подробно механизм вывода.

Введем ряд вспомогательных множеств:

Список выводов. В список заносятся последовательно номера всех правил базы знаний и свойства, расположенные в части "То" соответствующих правил. Т.е. список это упорядоченное множество вида $\{ \langle p, s_{j,p}, z_{j,p} \rangle \}$, где p – порядковый номер правила базы знаний; $s_{j,p} \in S_3$ – свойства аппаратов и ребер, определяемые правилами; $z_{j,p} \in Z_j$ - значение свойства.

Стек условий. Стек представляет собой упорядоченное множество пар $\{ \langle p, f_p \rangle \}$, где p – номер правила; f_p – функция-условие вида (2.6,2.8,2.9,2.11,2.12).

В стек заносятся номера всех правил, содержащие в части вывода искомое свойство, и свойства-условия.

Список ограничений условия ставит в соответствие каждому элементарному ограничению в правиле номер. Это позволяет упростить проверку элементарных ограничений и исключить повторное установление одного и того же факта.

Список ошибок содержит информацию о невыполненных правилах базы знаний. Он служит для последующего разъяснения пользователю допущенных в процессе проектирования ошибок. Список представляет собой множество пар вида $\{ \langle p, n_p \rangle \}$, где n_p - номер невыполненного условия.

Для проверки применим обратный механизм вывода. Из базы знаний в список выводов записываются все правила. Далее последовательно будем

выбирать из этого списка те правила, которые определяют свойства объекта. При этом сравнивается значение свойства, определенное правилом, с текущим значением. Если правилом определяется другое значение, то оно не рассматривается. Выбранные правила записываются в стек условий.

Для проверки из стека будем извлекать последовательно все правила. Для этого правила в список ограничений условия записываем соответствующие элементарные ограничения свойств объектов и областей. Эти свойства в свою очередь могут определяться правилами, заданными в базе знаний.

Если значение свойства объекта или области отсутствует в рабочей памяти (свойство не определено), то осуществляется поиск правил, определяющих значение неизвестных свойств, в списке выводов. Эти правила записываются в стек условий. Процесс проверки переходит первому правилу в стеке. Таким образом, осуществляется определение свойств объектов и областей.

Если все значения свойств, необходимые для определения выполнения условия, определены, то они подставляются в функцию условия, и проверяется выполнение правила.

Правило считается выполненным, если функция-условие f_p , записанная в стек логических выводов имеет значение истины (логическая 1). Если правило не выполняется, то его номер и номер невыполненного условия заносится в список ошибок.

Проверка продолжается до последнего правила в стеке. После окончания проверки правила выбираются из списка ошибок. Для пользователя строится протокол проверки, содержащий номер правила, номер невыполненного условия и само правило.

Приведенная процедура проверки проводится для каждого объекта. Таким образом, устанавливается выполнение всех правил системы ограничений для каждого объекта и области. При наличии ошибок процедура не останавливается, что позволяет за один проход проверить систему ограничений и получить список невыполненных правил.

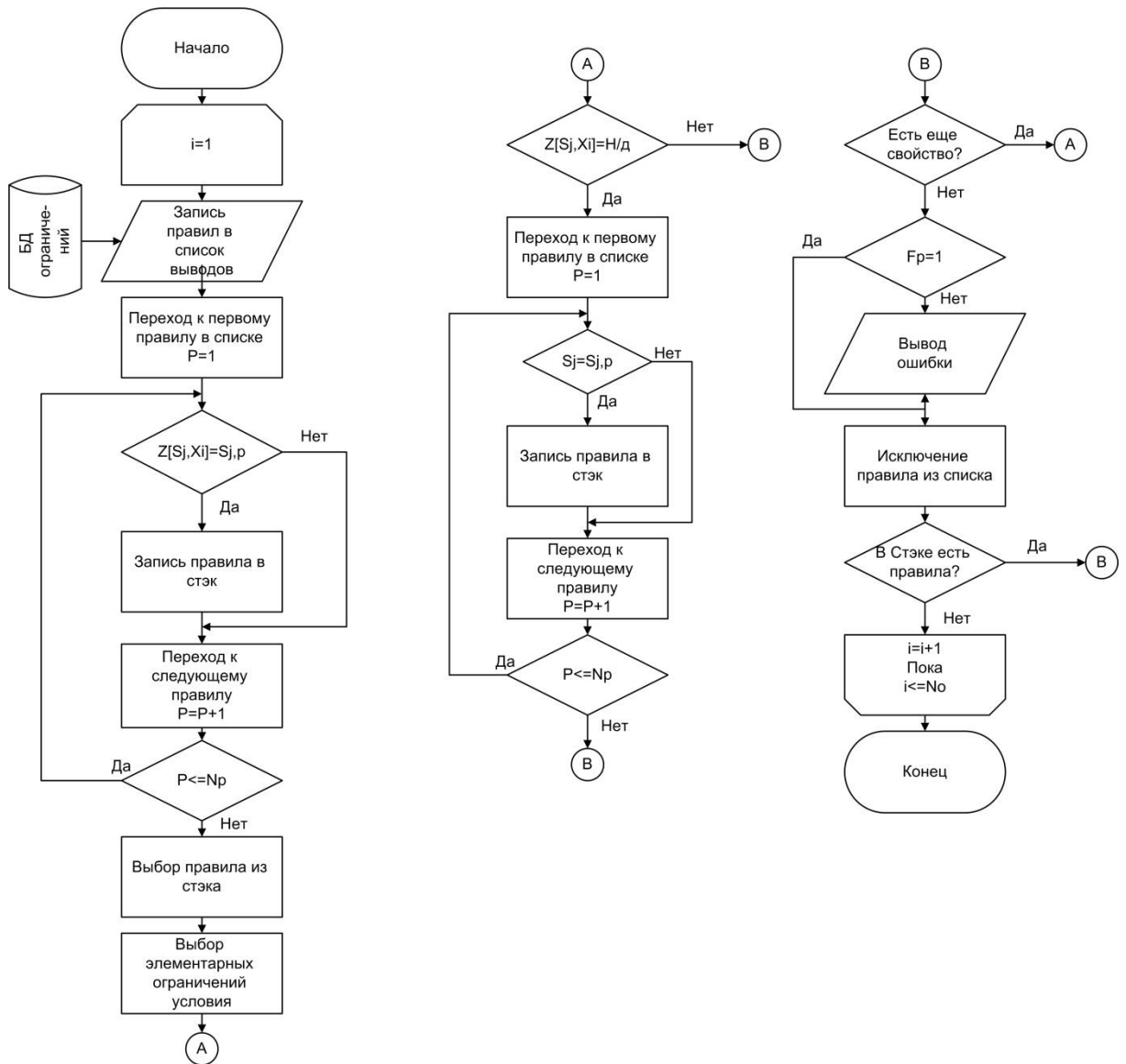


Рисунок 3.2 – Блок схема процедуры проверки ограничений

При решении задачи компоновки на каждом шаге алгоритма изменяются свойства одного или малой группы объектов. Таким образом, проверка выполнения всей системы правил нецелесообразна. Достаточно проверить правила, в которых участвуют измененные свойства группы объектов. Тогда для проверки в стек логического вывода извлекаются все правила, в условной части которых стоят ограничения изменившихся свойств.

3.3 Процедура получения начального допустимого варианта размещения

Одним из этапов решения задачи компоновки промышленных объектов является начальная или предварительная компоновка. На этом этапе получается вариант компоновки, удовлетворяющий всем заданным ограничениям. От полученного на этом этапе решения зависит оптимальность дальнейшего решения задачи. Рассмотрим метод получения начального допустимого варианта размещения, основанный на использовании механизмов экспертных систем.

Для получения первоначального варианта необходимо определить области, в которых возможно размещение каждого из объектов и выбрать из возможных вариантов наилучший.

Рассмотрим процесс определения принадлежности аппарата помещению (рисунок 3.3). Последовательно рассматривается принадлежность каждого аппарата помещению. Выбирается аппарат, и для него с помощью экспертной системы определяются области, в которых он может быть размещен.

Для этого в список выводов записываются все правила типа 1, то есть определяющие возможность размещения объекта в области. Они же записываются в стек условий.

Далее последовательно рассматриваются все правила. Из стека извлекается последнее правило. Для этого правила в список ограничений условия записываем соответствующие элементарные ограничения свойств объектов и областей. После чего определяем их выполнение.

Свойства аппаратов и помещений, ограниченные условиями, также могут определяться правилами. Тогда дальнейшая проверка определяется следующим образом. Согласно приведенной классификации, возможны три случая: свойства аппарата зависят от свойств помещения; свойства аппарата зависят от свойств других аппаратов; свойства помещения зависят от свойств аппаратов. Для первого случая проверяются правила типа 3, для второго и третьего типов 4 и 2

соответственно. Для каждого элементарного ограничения выполняется поиск в списке выводов правил соответствующего типа, определяющих эти свойства. Если для свойства нет таких правил, то проверяется соответствие фактического значения свойства условию. Иначе правило заносится в стек логических выводов и процесс проверки переходит к нему. Полученные значения элементарных ограничений подставляются в функцию-условие (3,5,6,8). Правило считается доказанным, если функция условие имеет значение истины (логической 1).

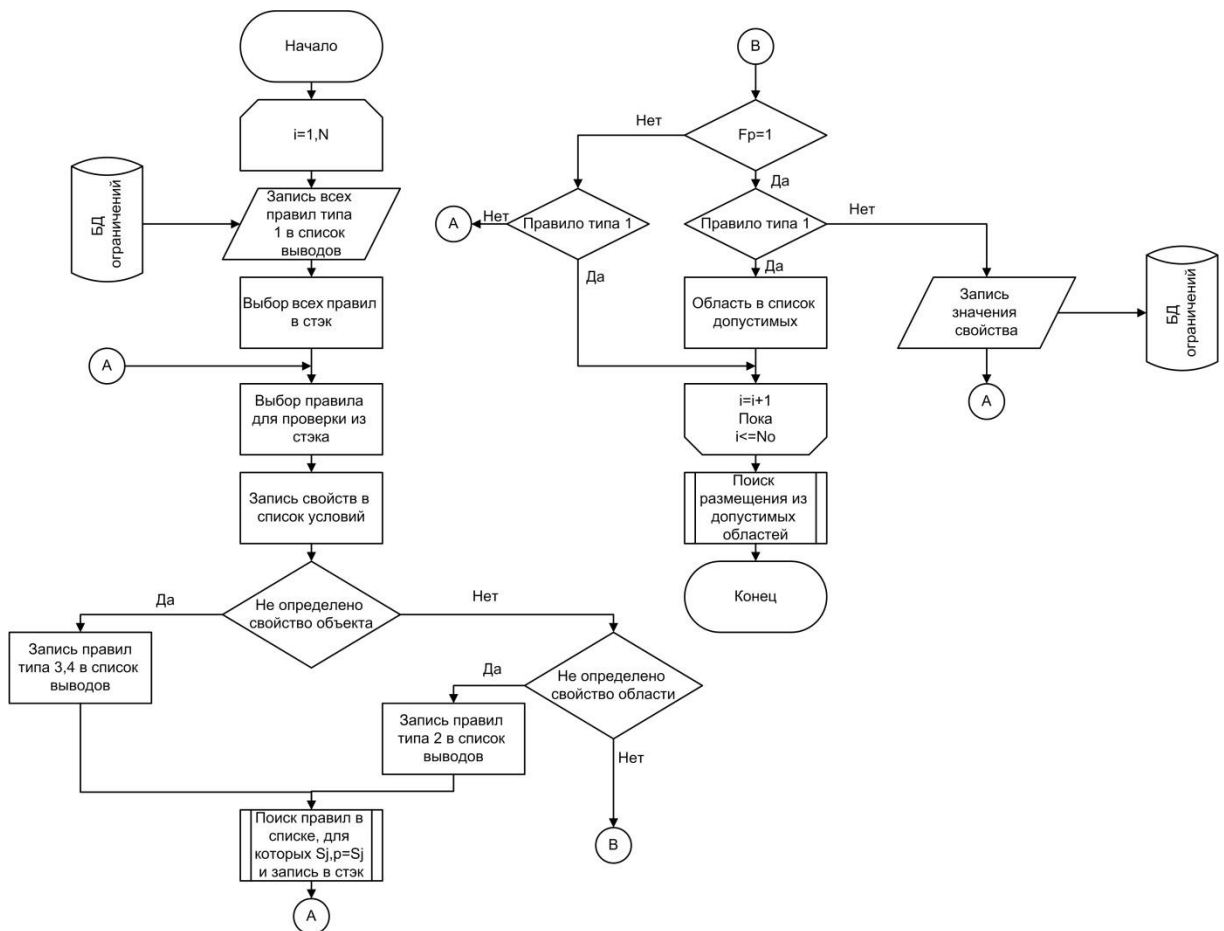


Рисунок 3.3 – Блок схема процедуры получения начального допустимого варианта компоновки

После доказательства первого правила, процесс доказательства переходит к следующему. Данный процесс производится для каждого объекта, который необходимо разместить.

Если в рассмотренной цепочке вывода выполняется несколько правил, определяющих принадлежность к разным областям, то все области, для которых

доказаны правила о принадлежности объекта, заносятся в список допустимых областей.

Список допустимых областей строится последовательно для каждого размещаемого объекта. При этом первым выбирается объект, имеющий наименьшее количество связей:

$$\rho_i = \sum_j |l_{i,j}| \rightarrow \min .$$

Выбор области размещения из списка допустимых выполняется на основе критерия минимального количества внешних связей. Рассмотрим подробнее процедуру поиска области размещения (Рисунок 3.4).

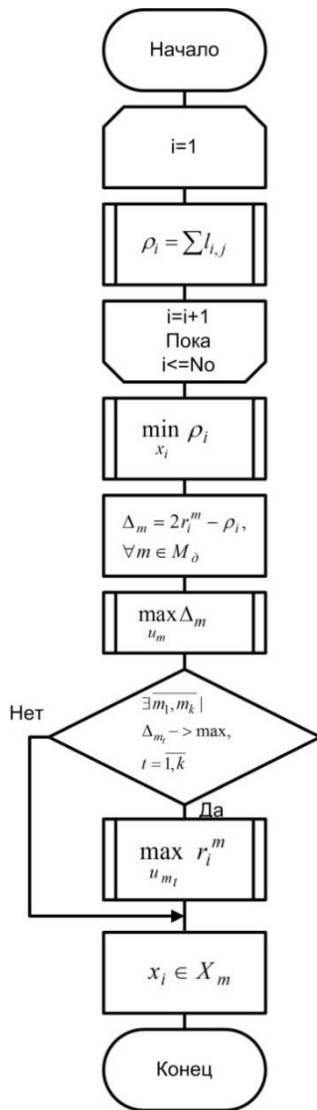


Рисунок 3.4 – Блок-схема выбора области размещения

Для определения размещения очередного объекта будем рассматривать минимальное приращение внешних связей. Для его определения рассмотрим разницу внешних и внутренних связей $\Delta_m = r_i^m - \overline{r_i^m}$ или $\Delta_m = 2r_i^m - \rho_i$, где r_i^m - количество связей с уже размещенными в области объектами, $\overline{r_i^m}$ - количество связей с другими объектами. Так как количество внешних связей обратно пропорционально разнице внешних и внутренних связей, то для размещения будем выбирать область, в которой $\Delta_m \rightarrow \max$. Если таких областей несколько, то выбирается область, для которой $r_i^m \rightarrow \max$.

3.4 Методика решения задач компоновки

При решении задачи компоновки промышленных объектов исходными данными являются: множество размещаемого оборудования; объемно-планировочное решение для монтажной области; технологическая схема; система ограничений, которым должно удовлетворять решение. Результатом решения задачи является оптимальное проектное решение по компоновке промышленных объектов, включающее следующие выходные данные: список областей размещения, включающий списки оборудования, размещенного в каждой области; координаты каждой единицы оборудования в соответствующей области; пространственное положение технологических соединений, заданное точками изменения направления.

Рассмотрим методику решения задачи компоновки (Рисунок 3.5).

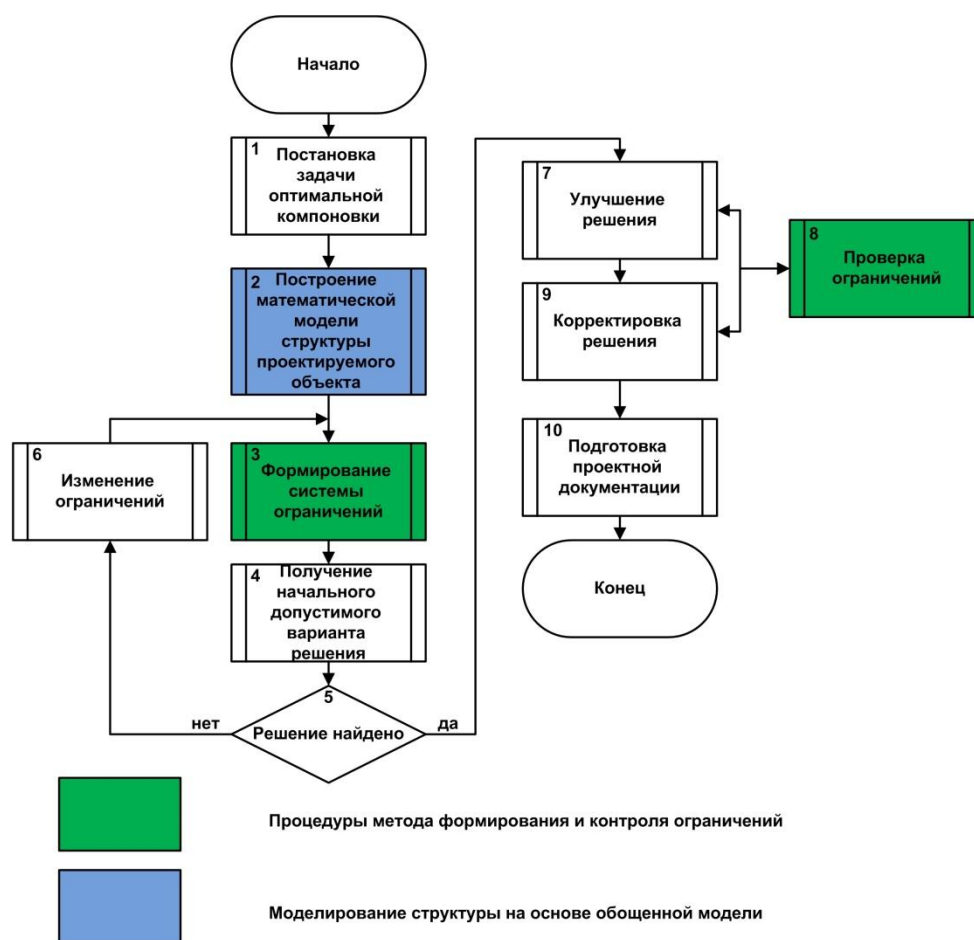


Рисунок 3.5 – Методика компоновки промышленных объектов

Постановка задачи (блок 1) включает в себя определение входных данных, параметров оборудования и характеристик областей размещения, критерия оптимальности, а также сформулировать систему ограничений, выполнение которых необходимо для получения допустимого решения. Для определения входных данных производится выбор состава технологического оборудования и объемно планировочной схемы. Данные задачи не решаются в данной работе. Методы выбора состава технологического оборудования рассмотрены в работах [3,10]. Выбор объемно-планировочного решения рассмотрен в работах [4].

Для выбранного технологического оборудования определяется состав значимых для решения параметров. Причем, этот набор для каждой единицы оборудования должен быть одинаковым. Если существует оборудование, имеющее уникальные значимые параметры, то они указываются для всего

оборудования, но остаются неопределенными. Таким образом, достигается условие однородности размещаемых объектов.

В объемно-планировочном решении необходимо выделить области размещения оборудования. Такими областями могут быть цеха, отделения, специально оборудованные площадки, а также обособленные группы оборудования. Для каждой области размещения определяется набор значимых характеристик. При этом также должно выполняться условие однородности, то есть множество характеристик для каждой области должно быть одинаковым.

Для определения качества получаемого решения и выбора наилучшего из допустимых вариантов определим критерий оптимизации. Для этого необходимо выделить основные показатели, влияющие на оптимальность решения. Выбор критерия оптимизации компоновки промышленных объектов описан в части 2.5 главы 2. В данной работе предложено использовать комплексный критерий стоимости реализации проекта (2.28).

На этом этапе определены необходимые данные для постановки задачи оптимальной компоновки промышленных объектов. Обобщенная постановка задачи компоновки приведена в части 2.7 главы 2.

Для решения поставленной задачи необходимо построить математическую модель. Построение математической модели для задачи компоновки промышленных объектов, согласно данной методике, будет состоять из двух этапов: построение модели структуры на основе базовой модели (блок 2) и формирование системы ограничений (блок 3).

Переходя к математической модели, зададим каждую единицу оборудования как x_i , где $i = \overline{1, N_o}$ - номер единицы оборудования. Тогда все оборудование образует множество вершин X гиперграфа G . Подробно структура N -ориентированного гиперграфа с ограничениями свойств вершин и ребер и его использование для моделирования технических систем при решении задачи компоновки описано в главе 2.

Каждому свойству оборудования присвоим номер и запишем как s_j , где $j = \overline{1, J^x}$ - номер свойства оборудования. Например, свойство «координата x» обозначим как s_1 , «координата y» как s_2 , «координата z» как s_3 . Определим также множество допустимых значений каждого свойства Z_j . Это необходимо для контроля правильности задания значения.

Зададим области с помощью ребер гиперграфа u_m , где $m = \overline{1, M}$ - номер области.

Свойства областей зададим аналогично как s_j , где $j = \overline{1, J^u}$ - номер свойства области. Соответственно определим и множество допустимых значений Z_j . Тогда множество ребер U вместе со свойствами гиперграфа G описывает объемно-планировочное решение.

Далее необходимо задать систему технологических связей, то есть определить подграф $G_l(X, U^L)$. Для этого построим матрицу инцидентности $L = \{l_{p1, p2}\}$. Каждой единице оборудования в этой матрице соответствует строка, а столбец соответствует технологическому соединению. При построчном заполнении матрицы определяется система связей соответствующей единицы оборудования. В ячейке указывается -1, если соответствующая единица оборудования является источником, и 1, если приемником.

Каждая связь в этом случае является ребром гиперграфа и обладает множеством свойств. Это множество необходимо определить аналогично свойствам областей как s_j , где $j = \overline{1, J^l}$ - номер свойства соединения. Множество свойств для всех соединений должно быть одинаковым. Соответственно определим множество допустимых значений Z_j . К свойствам соединения будем относить, кроме определяющих геометрическое положение в пространстве, следующие: тип, диаметр, вывод (штуцер) источник, вывод (штуцер) приемник, тип транспорта веществ для трубопроводов, максимальная длина и другие.

Описание системы технологических соединений и их свойств, а также примеры свойств технологического соединения приведены в части 2.2 главы 2.

На этом этапе построена математическая модель структуры объекта. Далее, необходимо сформировать систему ограничений (блок 3) согласно процедуре формирования ограничений метода формирования и контроля ограничений, описанной в части 3.1 главы 3. Общий вид ограничений (2.13) и примеры записи основных ограничений (2.14-2.19) приведены в части 2.3 главы 2. При этом ограничение может содержать комбинацию элементарных ограничений свойств вершин и ребер, правила комбинации ограничений (2.6,2.8,2.9,2.11,2.12) описаны в части 2.2 главы 2. Входными данными для этого этапа является экспертная информация о правилах компоновки. После применения к ней описанной процедуры на выходе получаем формализованную систему ограничений.

Перейдем к решению поставленной задачи, которое будет состоять из трех основных этапов: получения начального допустимого варианта (блок 4), улучшения решения (блок 7), корректировки решения (блок 10). Рассмотрим подробнее эти этапы.

Так как применение точных методов для задач оптимизации большой размерности практически невозможно, то применим итерационные методы для решения задачи компоновки промышленных объектов. Исходными данными для таких методов является некоторое начальное приближение, то есть вариант решения, удовлетворяющий всем заданным ограничениям. Будем называть такой вариант допустимым. Процедура получения начального допустимого варианта компоновки является частью метода формирования и контроля ограничений и описана в части 3.3 главы 3.

Если получить допустимый вариант компоновки невозможно (блок 5), то построенная модель неадекватна объекту. Тогда необходимо изменить заданную систему ограничений (блок 6) и заново произвести процедуру формирования системы ограничений (блок 3).

Далее, на основе полученного допустимого варианта, итерационным методом получим оптимальное решение. В качестве метода улучшения можно выбрать следующие: методы нелинейной оптимизации (например, метод покоординатного спуска и основанные на нем) [24]; эвристические методы (например, методы попарного обмена); генетические алгоритмы.

В процессе улучшения решения необходимо обеспечить выполнение системы ограничений для получаемых вариантов решения (блок 8). Для проверки соответствия решения заданной системе ограничений применим процедуру контроля ограничений метода формирования и контроля ограничений, описанного в части 3.2 главы 3.

Если полученный вариант не удовлетворяет требованиям лица, принимающего решения, то производится его корректировка (блок 9). То есть ЛПР вручную вносит изменение в вариант компоновки до достижения необходимого результата. При этом после внесения любого изменения производится проверка системы правил рассмотренным выше методом. Если полученный вариант не удовлетворяет системе ограничений, то изменения не сохраняются.

При получении варианта решения, удовлетворяющего требованиям ЛПР, производится оформление проектной документации (блок 10).

Выводы к Главе 3:

1. Разработан метод формирования и контроля ограничений, позволяющий учитывать систему ограничений, обусловленную спецификой решаемых задач, требованиями нормативных документов, технологическими требованиями и пр.

2. Разработана процедура формирования ограничений, позволяющая формализовать систему ограничений в виде производственных правил для использования в экспертной системе.

3. Предложена грамматика формального языка для записи ограничений, позволяющая представить формализованные ограничения в виде, пригодном для использования в экспертной системе.
4. Разработана процедура получения начального допустимого варианта компоновки, позволяющая с применением механизмов экспертных систем находить вариант размещения объектов, удовлетворяющий всем ограничениям, для последующего поиска оптимального решения.
5. Разработана процедура контроля ограничений с применением экспертной системы, которая позволяет осуществлять контроль системы ограничений в получаемом решении.
6. Предложена методика решения задачи компоновки промышленных объектов с использованием разработанного подхода.

Глава 4 Комплекс программ по компоновке промышленных объектов

При анализе предметной области было выявлено, что существующие программные комплексы, предназначенные для автоматизации конструкторского проектирования, обладают следующими существенными недостатками:

1. Специализация на конкретной решаемой ими задаче.
2. Учет только основных ограничений.
3. Отсутствие возможности добавления новых ограничений без модификации программного комплекса.

При этом модификация программных комплексов требует больших затрат и труда высококвалифицированных программистов.

Поэтому на основе приведенного математического аппарата разработан комплекс прикладных программ для автоматизированного проектирования компоновки промышленных объектов. Исходя из выявленных недостатков современных систем конструкторского проектирования, определены основные требования к разработанному комплексу прикладных программ:

1. Организация системы ограничений в виде реляционной базы данных.
2. Реализация пользовательского интерфейса и механизмов гибкого задания системы ограничений в виде правил.
3. Реализация механизмов экспертных систем для контроля ограничений при автоматизированном решении задачи

Для разработки пакета прикладных программ был выбран язык программирования C++. Выбор сделан по ряду причин. Во-первых, гибкость работы с динамическими типами данных. Во-вторых, наличие средств быстрой разработки приложений (RAD) и графического интерфейса пользователя. В-третьих, данный язык полностью обеспечивает возможность решения поставленных задач.

Для реализации проектируемой системы была выбрана интерактивная среда разработки Borland C++Builder 6.0, которая является системой объектно-

ориентированного программирования для 32-разрядных операционных систем Microsoft Windows. Интегрированная среда системы (Integrated Development Environment, IDE) обеспечивает продуктивность многократного использования визуальных компонентов в сочетании с усовершенствованными инструментами и разномасштабными средствами доступа к базам данных. Система C++Builder позволяет в кратчайшие сроки создавать прикладные приложения расширенным стандартом языка C++, повысить быстродействие и надежность программ, придать пользовательскому интерфейсу качество профессионального уровня. Система предоставляет удобный доступ к COM – серверам. Для работы с БД использован язык SQL.

Пакет предназначен для получения проектных решений по компоновке промышленных объектов. Основной областью применения является конструирование предприятий многоассортиментной химической промышленности.

4.1 Структура программного комплекса

Комплекс программ для автоматизированного проектирования компоновки промышленных объектов это сложная, многоструктурная система. Состоит из ряда взаимосвязанных блоков.

В комплекс программ для автоматизированного проектирования компоновки промышленных объектов входит следующий набор основных блоков:

- База знаний;
- Блок решения;
- Библиотеки расчетов;
- Интерфейс пользователя.

Интерфейс пользователя содержит следующие блоки:

- Блок визуализации;
- Блок выбора оборудования;

- Блок задания связей;
- Блок формирования документации.

Блок решения состоит из следующих блоков:

- Блок контроля ограничений;
- Блок получения начального допустимого варианта компоновки;
- Блок получения оптимального варианта компоновки.

Рассмотрим перечисленные блоки более подробно. Структурная схема представлена на рисунке 4.1.

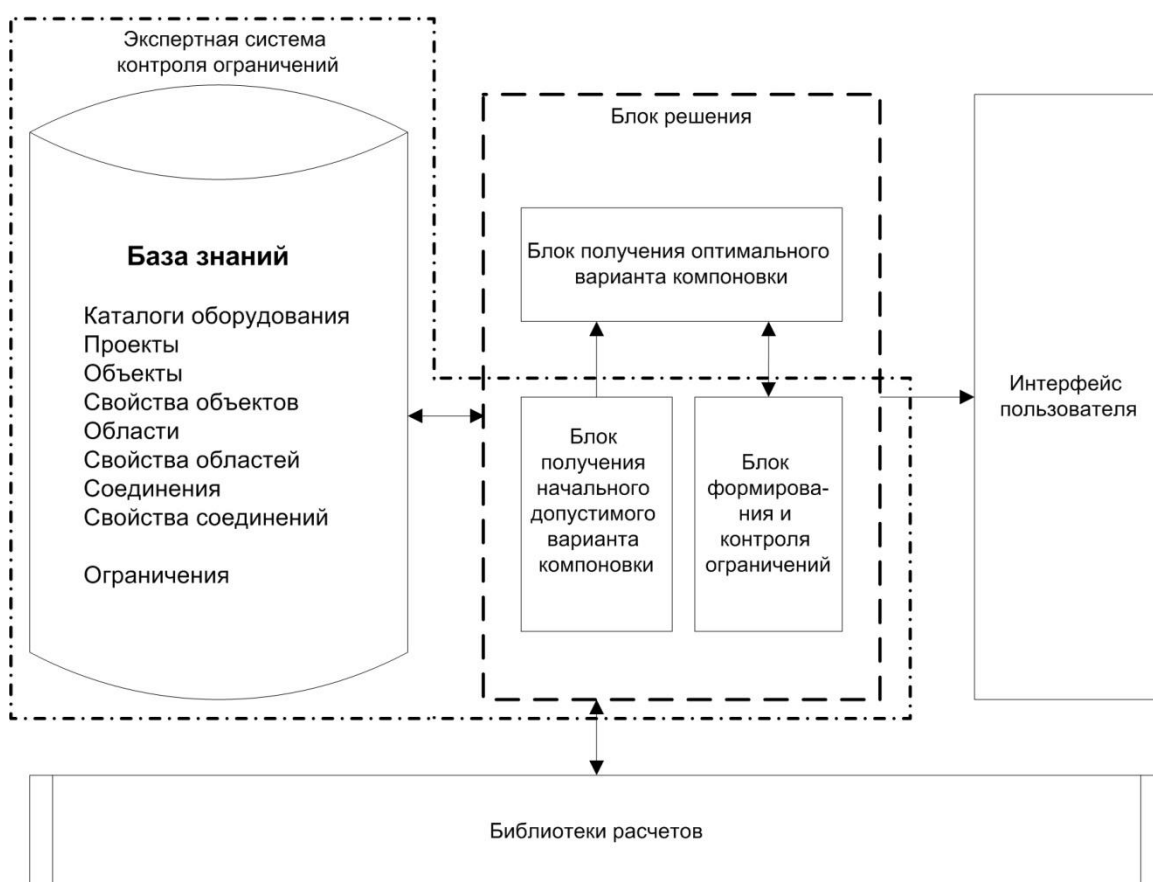


Рисунок 4.1 – Структурная схема

База знаний обеспечивает удобное физическое представление информации, а также её хранение. Она активно используется другими блоками. Блок направлен на координацию информационных потоков, обеспечивает доступ к информации о готовых проектах, технологическом оборудовании, технологических соединениях, ограничениях. База знаний в процессе своей работы использует dBase-драйвер управления БД. Такой подход служит для обеспечения высокой

скорости работы и предотвращения потерь хранимых данных. Информация об оборудовании в рассматриваемой системе представлена в виде электронно-графического каталога объектов. Рассмотрим подробнее его устройство.

Назначение каталогов – структуризация и предоставление информации в удобном для специалистов виде. [2] При этом информация об оборудовании включает в себя не только параметры оборудования, его описание и другую текстовую информацию, но и набор графической информации, включающей в себя 2D чертежи и параметрические 3D модели оборудования. Такие системы позволяют быстро получить все необходимые сведения о любом оборудовании, хранящемся в каталоге, просмотреть его чертежи, которые в последствие можно использовать при оформлении документации. Данные электронно-графического каталога используются при автоматизированном решении задач проектирования.

Для того чтобы графический каталог отвечает следующим требованиям:

- обеспечивает быструю выборку информации в удобной форме и удовлетворять запросы широкого круга специалистов;
- не содержит противоречий как внутри одного каталога, так и между различными каталогами;
- обладает максимальной полнотой в соответствующей области;
- обеспечивает расширение и изменение содержания при неизменных принципах организации информации.

Графические образы оборудования целесообразно хранить в векторных графических форматах DXF для 3D моделей и DWF для 2D чертежей. Выбор форматов объясняется их широкой распространенностью и доступностью для разработчиков их спецификаций.

Возможность работы с БД и графическими образами обеспечивается ядром системы. Ядром системы является программа, предоставляющая пользователю возможности просмотра, редактирования и дополнения информации электронно-графических каталогов.

Рассмотрим подробнее структуру системы, которая приведена на рисунке 4.2.

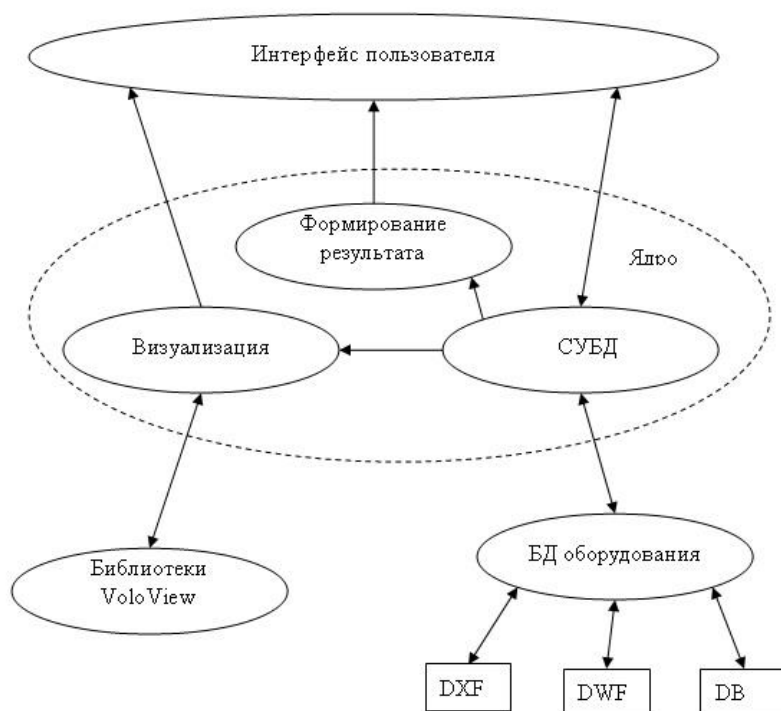


Рисунок 4.2 – Структура системы электронных каталогов

Под интерфейсом пользователя понимается дизайн дружелюбного интерфейса направленный на ведение интерактивного диалога с пользователем системы. В основные функции интерфейса пользователя входит отображение текущей информации, например, о технических параметрах выбранного оборудования, а также удобное отображение графического образа просматриваемого оборудования.

В функции визуализации входит формирование графического представления 3D объекта и 2D чертежей по информации, полученной из СУБД. При этом важны фактические размеры выбираемого оборудования. В связи с чем, при формировании графического образа происходит параметризованное построение 3D объекта, согласно типоразмерам, содержащимся в базе данных. 2D чертежи служат для иллюстрации выбираемой единицы оборудования с указанием соответствующих размеров. Данный подход позволяет предоставить пользователю соответствующие выбранному типоразмеру двумерные и

трехмерные отображения оборудования. При этом не требуется хранить отдельный чертеж и 3D модель для каждого типоразмера, которых для каждой конкретной единицы оборудования может быть достаточно много. Это позволяет избежать избыточности данных, а также снизить объем занимаемой каталогом памяти.

Рассмотрим создание графического 3D образа по информации, полученной из БД оборудования. В БД хранится программа на языке AutoLISP, позволяющая при каждом обращении к ней формировать новый чертёж, с необходимыми размерами. При выборе записи из каталога осуществляется повторное обращение к БД оборудования с целью проведения инициализации параметрических переменных конечными значениями типоразмеров для выбираемого оборудования. Далее осуществляется построение 3D образа средствами языка AutoLISP. Отдельно следует отметить о наличии хранимой в БД информации о названии параметрических переменных, которые присутствуют в подключаемом при создании графического образа LSP файле.

Система электронно-графических каталогов в своем составе имеет средства для редактирования, добавления и удаления записей каталога. Вследствие этого интерфейс пользователя системы содержит элементы, позволяющие управлять содержимым БД. При этом не нужно обладать знаниями об устройстве системы, достаточно лишь заполнить поля БД и указать путь к директории, содержащей 2D чертежи и 3D модели добавляемого оборудования. Наличие возможности редактирования и обновления каталогов позволяет им быть всегда актуальными.

Форма выходной информации представляет собой DB файл, в котором содержится перечень сведений о выбранном оборудовании, а также ссылки на директорию, в которой располагаются файлы, содержащие графические образы оборудования.

Блок визуализации направлен на повышение удобств пользования системой и быстрый и качественный вывод графической информации пользователю. Для визуализации векторных графических данных служит COM (Component Object

Model – объектная модель компонентов) – объект Autodesk VoloView Control. Векторно-графические данные хранятся в виде файлов формата DXF, формат является совместимым с продуктами фирмы Autodesk. Возможности данного интерфейса позволяют быстро и качественно отображать трёхмерные объекты с удобным управлением параметрами отображения (рисунок 4.3).

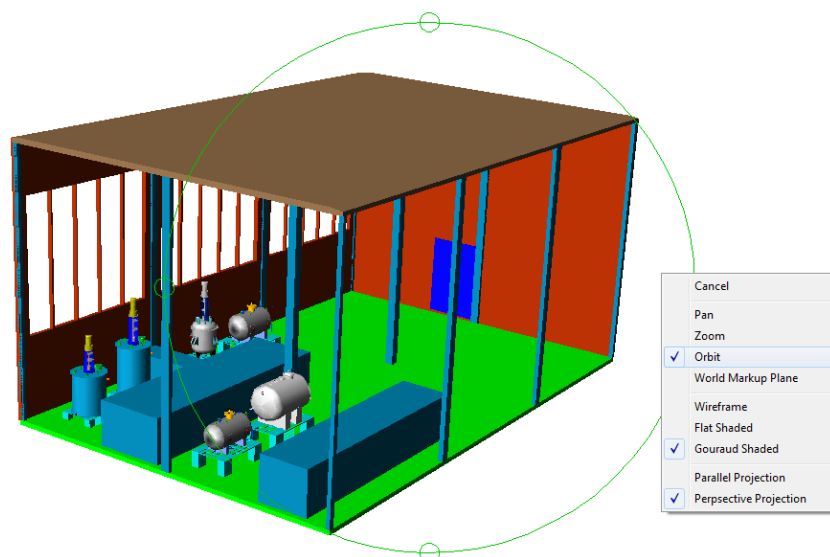


Рисунок 4.3 – Блок визуализации

Применение интерфейса Autodesk VoloView для визуализации графических образов позволяет предоставить пользователю информацию об оборудовании в наиболее удобном виде. Имеется возможность гибкого изменения параметров при просмотре пространственного образа.

Другой важной функцией блока визуализации является мгновенное отображение компоновочного решения на видовых проекциях цеха. Горизонтальная и фронтальная проекция позволяют проводить редактирование размещенного по цеху оборудования. Полезной функцией этого блока является визуальный контроль выполнения системы ограничений. Проверка и отображение результата проверки происходит «на лету». Во время проверки корректности размещения оборудования происходит обращение к блоку контроля ограничений.

Блок выбора оборудования служит для предоставления пользователю удобного доступа к перечню хранимого оборудования и обеспечения действий по

добавлению или удалению технологического оборудования в проекте. Блок, получая сведения от блока хранения информации, отображает её в виде древовидной структуры. Следует отметить, что любые действия пользователя по изменению списка оборудования отслеживаются и сохраняются в таблице оборудования (рисунок 4.4).

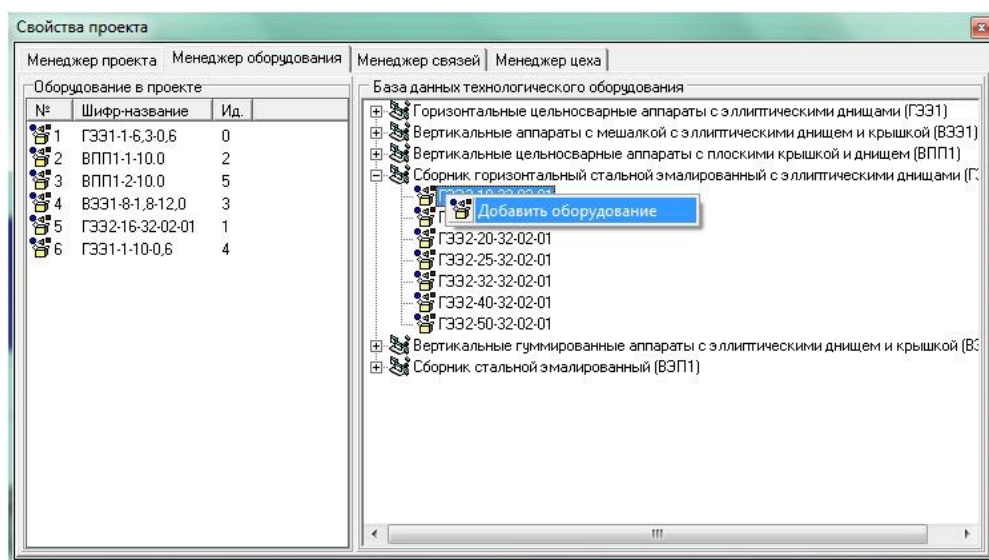


Рисунок 4.4 – Блок выбора оборудования

При необходимости, имеется возможность обращения к свойству добавленного оборудования. Это позволяет изменить размеры зоны обслуживания, а также минимальное расстояние до выбранной единицы оборудования.

Блок задания связей предоставляет пользователю удобный доступ к технологическим связям между оборудованием и обеспечивает добавление или удаление технологических связей в проекте (рисунок 4.5).

После получения сведений от блока хранения информации о связях в проекте, блок задания связей отображает их в табличной форме и предоставляет возможность их редактирования. Следует отметить, что любые действия пользователя по изменению конфигурации связей, также отслеживаются и сохраняются в таблице технологических связей.

Блок формирования документации создаёт отчет с информацией о разработанном проекте. В отчёте отражены сведения о положении базовых точек,

конфигурации запрещенных зон, конфигурации производственного помещения, ограничениях.

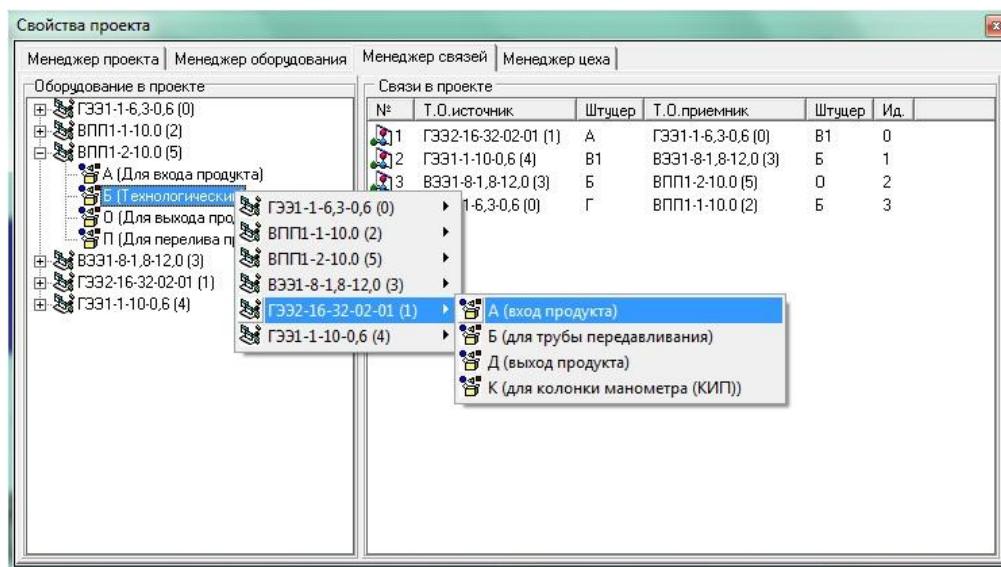


Рисунок 4.5 – Блок задания связей

Для ручного задания варианта размещения оборудования, а также для задания положения запрещенных зон, ручного редактирования трасс технологических соединений используется графический редактор (рисунок 4.6). Графический редактор представляет собой план и разрез цеха, на котором отображаются аппараты, трассы трубопроводов, арматура, металлоконструкции, сервисные зоны аппаратов и запрещенные зоны. При этом, пользователь в блоке настройки вида может выбирать какие объекты отображать или не отображать. При этом включение или выключение отображения включает или выключает соответствующий блок визуализации объектов, но статус проверки ограничения связанное с этим типом объектов остается неизменным.



Рисунок 4.6 – Графический редактор

Блок графического редактора связан с блоками свойств объекта и свойств областей (рисунок 4.7). В блоке свойств аппарата, пользователю предоставляется информация о нем, а также возможность редактирования зоны обслуживания. В блоке свойств запрещенных зон пользователь может изменить информацию о зоне, ее положение и габариты.

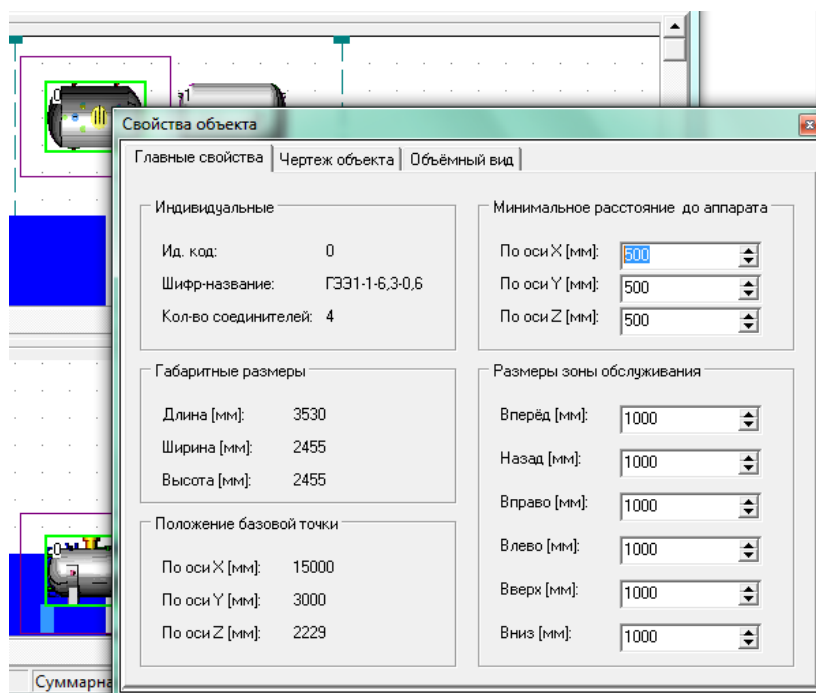


Рисунок 4.7 – Свойства объекта

Библиотеки расчетов являются подключаемыми модулями, содержащими функции расчетов критерия и ограничений. Необходимость использования такого механизма обусловлена различными требованиями к оптимальности проектов и, как следствие, использование различных критериев. Также для определения выполнения некоторых ограничений необходимы дополнительные расчеты, которые невозможно представить в виде линейной функции от значений свойств объектов. Применение подключаемых библиотек расчетов позволяет расширять область применения программного комплекса без изменения его целиком, а только путем добавления новых модулей.

Блок получения начального допустимого варианта компоновки, используя сведения о перечне оборудования, заданных межаппаратных связях и заданную систему ограничений, осуществляет первоначальное размещение оборудования внутри цеха. Области размещения каждой единицы оборудования определяется процедурой получения начального допустимого варианта компоновки, описанной в главе 3. На этом этапе экспертной системой определяется вариант компоновки по областям, удовлетворяющий системе ограничений.

Для нахождения положения базовых точек внутри определенной области используется метод последовательного размещения. Чтобы ускорить процесс поиска первоначальных координат базовых точек, поиск осуществляется по координатной сетке с заранее определённым, одинаковым шагом. На каждом шаге блоком формирования и контроля ограничений проверяется выполнение системы ограничений.

Далее в работу включается блок поиска оптимального размещения. В начале своей работы он использует вариант размещения оборудования, полученный после блока предварительного размещения. Далее происходит уточнение положения базовых точек по координатным спускам по каждому аппарату с локализацией минимума по каждому аппарату методом Пауэлла. При этом на каждой итерации работы этого метода происходит вызов блока

формирования и контроля ограничений с целью обеспечения выполнения заданной системы ограничений.

Блок формирования и контроля ограничений служит для создания и управления системой ограничений. Причем внесение изменений в систему ограничений происходит на этапе исполнения программы. Блоки формирования и контроля ограничений, а также получения начального допустимого варианта компоновки образуют вместе с базой знаний экспертную систему контроля ограничений.

4.2 Структура экспертной системы

Экспертная система контроля ограничений является основным блоком разработанной системы. Ее функциями являются:

- формирование системы ограничений в виде продукционных правил согласно процедуре, описанной в главе 3;
- управление сформированной системой: включение или выключение из рассмотрения правил, добавление и удаление правил;
- проверка выполнения системы ограничений в процессе автоматизированного получения компоновки промышленных объектов;
- получение начального допустимого варианта компоновки.

Рассмотрим структуру экспертной системы (рисунок 4.8).

Ядром системы является механизм логического вывода, осуществляющий непосредственно проверку правил и изменение свойств на их основании в процессе функционирования рассмотренных ранее процедур. В процессе вывода данный блок обращается к базе знаний, извлекая оттуда правила и свойства. Свойства объектов, извлеченные из базы знаний, преобразуются на основании правил и записываются обратно. Таким образом, механизм логического вывода осуществляет проверку и преобразование знаний на основании правил, содержащихся в базе знаний.

При проверке правил базы знаний необходим расчет специальных функций для установления факта. Данные функции содержатся в библиотеке функций расчетов. Механизм логического вывода в процессе работы обращается к библиотеке, передавая туда как параметры значения свойств объектов и получая значение функции. Полученное значение сравнивается с условием.

В процессе вывода при невыполнении правил механизм логического вывода передает в механизм разъяснения номер правила и номер невыполненного условия. Механизм разъяснения предназначен для протоколирования нарушений правил и доведения их до пользователя.



Рисунок 4.8 – Структура экспертной системы

При работе механизма логического вывода возможны конфликтные ситуации. То есть одновременно выполняются несколько правил, определяющих разные значения одного факта. В таком случае необходим механизм выбора правила или соответствующего значения факта из возможных альтернатив. Такая ситуация в данной задаче возникает в процессе определения начального допустимого варианта компоновки. Для одного объекта существует множество

допустимых областей размещения. Выбор варианта из возможных альтернатив выполняется на основе алгоритма выбора области размещения, рассмотренного в главе 3.

Формирование и управление системой ограничений выполняется с помощью пользовательского интерфейса. Данный блок представляет собой блок управления базой знаний. При формировании системы ограничений пользователь добавляет правила в соответствующий типу ограничения раздел. Для этого заполняется отдельно условие и заключение правила. Элементарные ограничения строятся исходя из доступных свойств объектов и областей. В зависимости от типа правила, условие и заключение содержат свойства соответствующих объектов. Внесенное правило записывается в базу знаний и отображается в списке правил.

Управление системой ограничений заключается в изменении параметров существующих правил и признака активности правила. Для этого из базы знаний извлекаются в список правил все ограничения. После редактирования правил, полученная система снова записывается в базу знаний. При удалении правила из базы знаний удаляется соответствующая запись, содержащая ссылки на свойства объектов, а также значения ограничений свойств объектов.

Таким образом, при формировании и изменении правила пользователь с помощью графического интерфейса формирует SQL-запрос к базе знаний для создания записи или поиска и изменения уже имеющейся.

Предложенная структура экспертной системы обеспечивает выполнение всех возложенных на нее функций. Также она имеет модульную структуру и возможность подключения библиотек расчетов, что позволяет расширить область применения системы. Организация записи ограничений с помощью правил позволяет задавать формализованные в виде (2.13) ограничения, что позволяет адаптировать систему для решения широкого класса задач компоновки.

4.3 Пример реализации предложенного подхода

Рассмотрим применение разработанного подхода к математическому моделированию компоновки промышленных объектов на примере компоновки отделения непрерывной механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья при производстве этилового спирта.

В содержательном виде постановка задачи компоновки отделения непрерывной механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья при производстве этилового спирта будет записана следующим образом:

Найти пространственное положение технологического оборудования (Таблица 4.1), такое, что критерий оптимальности в виде суммарного расстояния между связанными объектами будет достигать минимума при обеспечении системы технологических соединений, заданной технологической схемой отделения механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья (рисунок 4.9), и выполнении системы ограничений:

1. Условие непересечения аппаратов друг с другом.
2. Условие обеспечения транспорта веществ между аппаратами.
3. Условие обеспечения зон обслуживания аппаратов.
4. Условие размещения аппаратов внутри цеха.
5. Условие непересечения аппаратов со строительными колоннами.
6. Условие ограничения максимального расстояния между аппаратами.
7. Условие размещения тяжелых аппаратов по этажам.
8. Условие размещения крупногабаритных аппаратов по этажам.
9. Условие размещения аппаратов по этажам в зависимости от типа транспорта веществ.
10. Условие группировки аппаратов по типу.

Таблица 4.1 – Перечень размещаемого оборудования

Поз.	Наименование	Кол-во
1	Головка контактная	2
2	Аппарат механико-ферментативной обработки 1 ступени	1
3	Аппарат механико-ферментативной обработки 2 ступени	1
4	Насос для подачи массы на стерилизацию	2
5	Стерилизатор	1
6	Паросепаратор	1
7	Насос для подачи массы на охлаждение	2
8	Пластинчатый теплообменник	1
9	Осахариватель	2
10	Насос для подачи массы на охлаждение	2
11	Пластинчатый теплообменник	1

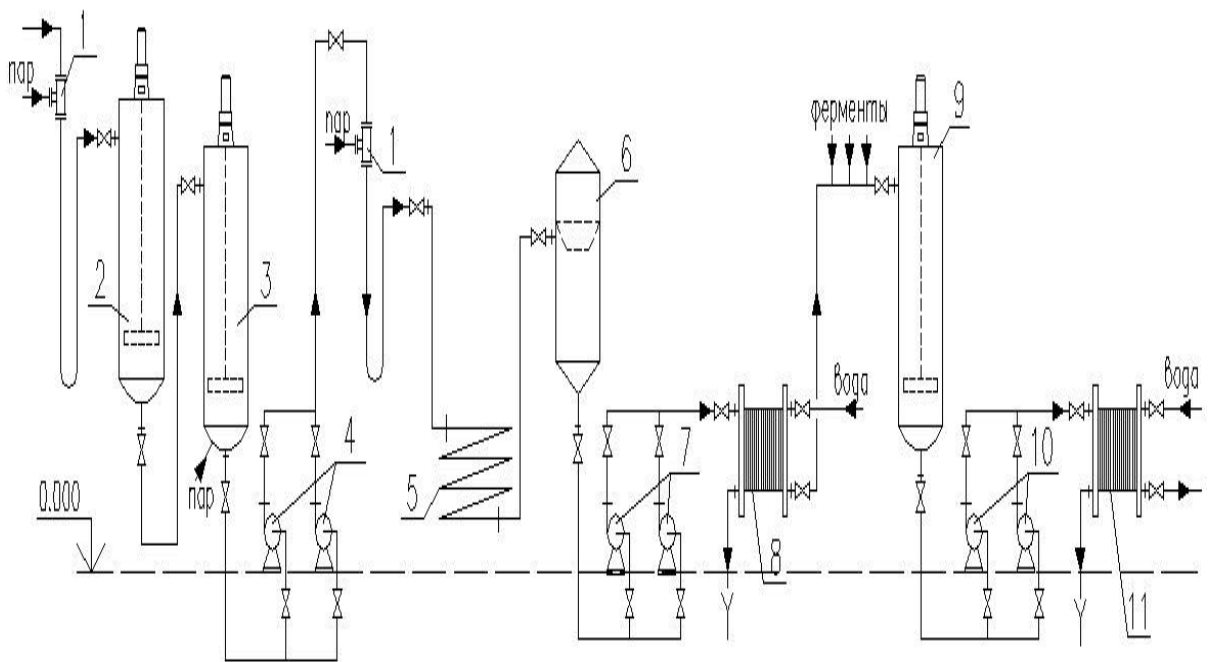


Рисунок 4.9 – Принципиальная технологическая схема механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья

Исходными данными для задачи компоновки отделения механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья являются перечень оборудования, тип и габаритные размеры оборудования, габаритные размеры зон обслуживания оборудования, а также габаритные размеры производственного здания, в котором должно быть размещено заданное оборудование. Необходимо разместить оборудование в соответствии с технологической схемой. Также

необходимо предусмотреть наличие зон обслуживания, при этом зоны обслуживания соседних аппаратов могут пересекаться, но в самой зоне обслуживания размещение оборудования запрещено. Согласно технологической схеме транспорт вещества между аппаратами механико-ферментативной обработки 1 и 2 ступени осуществляется самотеком, поэтому взаимное расположение аппаратов должно обеспечивать возможность такой транспортировки.

Так как задача трассировки технологических соединений в данной работе не рассматривается, то в качестве критерия будем использовать суммарное расстояние между аппаратами в прямоугольной метрике.

Приведем формализованную постановку задачи компоновки отделения непрерывной механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья при производстве этилового спирта.

Найти такой вариант компоновки промышленного объекта, заданного как:

$$G(X, U, U^L) \quad (4.1)$$

где $X = \{x_i\}, i = \overline{1, 16}$ - множество размещаемых аппаратов (Таблица 4.2);

$U = \{u_1, u_2\}$ - множество областей размещения: 1-й этаж (ребро u_1), 2-й этаж (ребро u_2);

$U^L = \{< x_i, x_j > | l_{i,k} = -1, l_{j,k} = 1, k = \overline{1, 18}\}$ - система технологических соединений, заданная согласно принципиальной технологической схеме механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья подграфом

$$G_l(X, U^L) \quad (4.2)$$

Подграф (4.2) определяется его матрицей инцидентности

$$L = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Таблица 4.2 – Соответствие оборудования вершинам N-ориентированного гиперграфа

x_1	Головка контактная
x_2	Головка контактная
x_3	Аппарат механико-ферментативной обработки 1 ступени
x_4	Аппарат механико-ферментативной обработки 2 ступени
x_5	Насос для подачи массы на стерилизацию
x_6	Насос для подачи массы на стерилизацию
x_7	Стерилизатор
x_8	Паросепаратор
x_9	Насос для подачи массы на охлаждение
x_{10}	Насос для подачи массы на охлаждение
x_{11}	Пластинчатый теплообменник
x_{12}	Осахариватель
x_{13}	Осахариватель
x_{14}	Насос для подачи массы на охлаждение
x_{15}	Насос для подачи массы на охлаждение
x_{16}	Пластинчатый теплообменник

Параметры размещаемых объектов заданы как множество свойств вершин гиперграфа (Таблица 4.3):

$$SX = \{s_j\}, j = \overline{1,15} \quad (4.4)$$

Таблица 4.3 – Свойства оборудования

Свойство	Имя свойства
s_1	Координата x
s_2	Координата y
s_3	Координата z
s_4	Угол поворота α
s_5	Габаритный размер по x
s_6	Габаритный размер по y
s_7	Габаритный размер по z
s_8	Зона обслуживания $+x$
s_9	Зона обслуживания $+y$
s_{10}	Зона обслуживания $+z$
s_{11}	Зона обслуживания $-x$
s_{12}	Зона обслуживания $-y$
s_{13}	Зона обслуживания $-z$
s_{14}	Масса
s_{15}	Тип

Характеристики областей размещения заданы как множество свойств ребер гиперграфа (Таблица 4.4):

$$SU = \{s_j\}, j = \overline{16,26} \quad (4.5)$$

Таблица 4.4 – Свойства областей размещения

Свойство	Имя свойства
s_{16}	Относительная координата x
s_{17}	Относительная координата y
s_{18}	Относительная координата z
s_{19}	Габаритный размер по x
s_{20}	Габаритный размер по y
s_{21}	Габаритный размер по z
s_{22}	Ширина пролета
s_{23}	Длина шага
s_{24}	Высота этажа
s_{25}	Габариты строительной колонны по x
s_{26}	Габариты строительной колонны по y

Параметры технологических соединений заданы как множество свойств ребер подграфа (Таблица 4.5):

$$SU^L = \{s_j\}, j = \overline{27,36} \quad (4.6)$$

Таблица 4.5 – Свойства технологических соединений

Свойство	Имя свойства
s_{27}	Координата x начала
s_{28}	Координата y начала
s_{29}	Координата z начала
s_{30}	Координата x конца
s_{31}	Координата y конца
s_{32}	Координата z конца
s_{33}	Координаты x точек изменения направления
s_{34}	Координаты y точек изменения направления
s_{35}	Координаты z точек изменения направления
s_{36}	Тип транспорта

При котором, критерий суммарного расстояния между объектами будет минимален:

$$\min R_L = \sum_{k=1}^{N_L} \left[(|z[s_1, x_i] - z[s_1, x_j]| + |z[s_2, x_i] - z[s_2, x_j]| + |z[s_3, x_i] - z[s_3, x_j]|) \right], \forall i, j \begin{cases} l_{i,k} = -1, \\ l_{j,k} = 1, \end{cases} \quad (4.7)$$

При выполнении следующих ограничений:

1. Условие непересечения аппаратов друг с другом

Если $x_i \in X_m$ И $x_j \in X_m$, то

$$\begin{aligned} & z[s_1, x_i] - z[s_5, x_i] > z[s_1, x_j] + z[s_5, x_j] \text{ ИЛИ} \\ & z[s_1, x_i] + z[s_5, x_i] < z[s_1, x_j] - z[s_5, x_j] \text{ ИЛИ} \\ & z[s_2, x_i] - z[s_6, x_i] > z[s_2, x_j] + z[s_6, x_j] \text{ ИЛИ} \\ & z[s_2, x_i] + z[s_6, x_i] < z[s_2, x_j] - z[s_6, x_j] \text{ ИЛИ} \\ & z[s_3, x_i] - z[s_7, x_i] > z[s_3, x_j] + z[s_7, x_j] \text{ ИЛИ} \\ & z[s_3, x_i] + z[s_7, x_i] < z[s_3, x_j] - z[s_7, x_j], \\ & \forall i \neq j, i = \overline{1,16}, j = \overline{1,16}, m = 1,2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

2. Условие обеспечение транспорта веществ самотеком между аппаратами

$$\begin{aligned} & \text{Если } z[s_{36}, u'_k] = \text{"самотек"} \text{ И } l_{i,k} = -1 \text{ И } l_{j,k} = 1, \\ & \text{то } z[s_3, x_j] - z[s_3, x_i] \geq d_z \\ & \forall k = \overline{1,18} \end{aligned} \quad (4.9)$$

3. Условие обеспечения зон обслуживания аппаратов

Если $x_i \in X_m$ И $x_j \in X_m$, то

$$\begin{aligned}
 & (z[s_1, x_i] - z[s_5, x_i] - z[s_{11}, x_i] > z[s_1, x_j] + z[s_5, x_j] \text{ ИЛИ} \\
 & z[s_1, x_i] + z[s_5, x_i] + z[s_8, x_i] < z[s_1, x_j] - z[s_5, x_j] \text{ ИЛИ} \\
 & z[s_2, x_i] - z[s_6, x_i] - z[s_{12}, x_i] > z[s_2, x_j] + z[s_6, x_j] \text{ ИЛИ} \\
 & z[s_2, x_i] + z[s_6, x_i] + z[s_9, x_i] < z[s_2, x_j] - z[s_6, x_j] \text{ ИЛИ} \\
 & z[s_3, x_i] - z[s_7, x_i] - z[s_{13}, x_i] > z[s_3, x_j] + z[s_7, x_j] \text{ ИЛИ} \\
 & z[s_3, x_i] + z[s_7, x_i] + z[s_{10}, x_i] < z[s_3, x_j] - z[s_7, x_j]) \text{ И} \\
 & (z[s_1, x_i] - z[s_5, x_i] > z[s_1, x_j] + z[s_5, x_j] + z[s_8, x_j] \text{ ИЛИ} \\
 & z[s_1, x_i] + z[s_5, x_i] < z[s_1, x_j] - z[s_5, x_j] - z[s_{11}, x_j] \text{ ИЛИ} \\
 & z[s_2, x_i] - z[s_6, x_i] > z[s_2, x_j] + z[s_6, x_j] + z[s_9, x_j] \text{ ИЛИ} \\
 & z[s_2, x_i] + z[s_6, x_i] < z[s_2, x_j] - z[s_6, x_j] - z[s_{12}, x_j] \text{ ИЛИ} \\
 & z[s_3, x_i] - z[s_7, x_i] > z[s_3, x_j] + z[s_7, x_j] + z[s_{10}, x_j] \text{ ИЛИ} \\
 & z[s_3, x_i] + z[s_7, x_i] < z[s_3, x_j] - z[s_7, x_j] - z[s_{13}, x_j]), \\
 & \forall i \neq j, i = \overline{1,16}, j = \overline{1,16}, m = 1,2
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

4. Условие размещения аппаратов внутри цеха

$$\begin{aligned}
 & \text{Если } x_i \in X_m, \text{ то } z[s_1, x_i] + \frac{1}{2} z[s_5, x_i] < z[s_{16}, u_m] + z[s_{19}, u_m] \text{ И} \\
 & z[s_2, x_i] + \frac{1}{2} z[s_6, x_i] < z[s_{17}, u_m] + z[s_{20}, u_m] \text{ И} \\
 & z[s_3, x_i] + \frac{1}{2} z[s_7, x_i] < z[s_{18}, u_m] + z[s_{21}, u_m] \text{ И} \\
 & z[s_1, x_i] - \frac{1}{2} z[s_5, x_i] < z[s_{16}, u_m] \text{ И} \\
 & z[s_2, x_i] - \frac{1}{2} z[s_6, x_i] < z[s_{17}, u_m] \text{ И} \\
 & z[s_3, x_i] - \frac{1}{2} z[s_7, x_i] < z[s_{18}, u_m], \\
 & \forall i = \overline{1,16}, m = 1,2
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

5. Условие непересечения аппаратов со строительными колоннами

$$\text{Если} \left(\begin{array}{l} z[s_1, x_i] - \frac{1}{2} z[s_5, x_i] > \frac{z[s_1, x_i]}{z[s_{23}, u_m]} z[s_{23}, u_m] + \frac{z[s_{24}, u_m]}{2} \text{И} \\ z[s_1, x_i] + \frac{1}{2} z[s_5, x_i] < \frac{z[s_1, x_i] + z[s_{23}, u_m]}{z[s_{23}, u_m]} z[s_{23}, u_m] - \frac{z[s_{24}, u_m]}{2} \end{array} \right)$$

ИЛИ

$$\left(\begin{array}{l} z[s_2, x_i] - \frac{1}{2} z[s_6, x_i] > \frac{z[s_2, x_i]}{z[s_{22}, u_m]} z[s_{22}, u_m] + \frac{z[s_{25}, u_m]}{2} \text{И} \\ z[s_2, x_i] + \frac{1}{2} z[s_6, x_i] < \frac{z[s_2, x_i] + z[s_{22}, u_m]}{z[s_{22}, u_m]} z[s_{22}, u_m] - \frac{z[s_{25}, u_m]}{2} \end{array} \right), \quad (4.12)$$

то $x_i \in X_m, \forall i = \overline{1,16}, m = 1,2$

6. Условие ограничения минимального расстояния между аппаратами

Если $x_i \in X_m$ И $x_j \in X_m$,

$$\text{то} \left| z[s_1, x_i] - z[s_1, x_j] \right| + \left| z[s_2, x_i] - z[s_2, x_j] \right| + \left| z[s_3, x_i] - z[s_3, x_j] \right| \geq 1.5, \quad (4.13)$$

$\forall i \neq j, i = \overline{1,16}, j = \overline{1,16}, m = 1,2$

7. Условие размещения крупногабаритных аппаратов по этажам

Если $z[s_7, x_i] > z[s_{21}, u_m]$ И $z[s_{17}, u_m] = 0$,

$$\text{то} x_i \in X_m, \forall i = \overline{1,16}, m = 1,2 \quad (4.14)$$

8. Условие размещения крупногабаритных аппаратов через перекрытие

Если $x_i \in X_m$ И $z[s_7, x_i] > z[s_{21}, u_m]$, то

$$z[s_1, x_i] + \frac{1}{2} z[s_5, x_i] < z[s_{16}, u_m] + z[s_{19}, u_m] \text{И}$$

$$z[s_2, x_i] + \frac{1}{2} z[s_6, x_i] < z[s_{17}, u_m] + z[s_{20}, u_m] \text{И}$$

$$z[s_1, x_i] - \frac{1}{2} z[s_5, x_i] < z[s_{16}, u_m] \text{И}$$

$$z[s_2, x_i] - \frac{1}{2} z[s_6, x_i] < z[s_{17}, u_m],$$

$\forall i = \overline{1,16}, m = 1,2$

(4.15)

9. Условие группировки аппаратов по типу

$$\begin{aligned} & \text{Если } z[s_{15}, x_i] = z[s_{15}, x_j] \text{ И } x_i \in X_m, \text{ то } x_j \in X_m, \\ & \forall i \neq j, i = \overline{1,16}, j = \overline{1,16}, m = 1,2 \end{aligned} \quad (4.16)$$

На формальном языке экспертной системы постановка задачи компоновки будет записана следующим образом:

1. Условие непересечения аппаратов друг с другом

ЕСЛИ $x(i)=um(m)$ И $x(j)=um(m)$, ТО

$$z[s(1),x(i)]-z[s(5),x(i)]>z[s(1),x(j)]+z[s(5),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(1),x(i)]+z[s(5),x(i)]<z[s(1),x(j)]-z[s(5),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(2),x(i)]-z[s(6),x(i)]>z[s(2),x(j)]+z[s(6),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(2),x(i)]+z[s(6),x(i)]<z[s(2),x(j)]-z[s(6),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(3),x(i)]-z[s(7),x(i)]>z[s(3),x(j)]+z[s(7),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(3),x(i)]+z[s(7),x(i)]<z[s(3),x(j)]-z[s(7),x(j)]$$

2. Условие обеспечение транспорта веществ самотеком между аппаратами

ЕСЛИ $z[s(36),ul(k)] = \text{“самотек”}$ И $l(i,k)=-1$ И $l(j,k)=1$,

ТО $z[s(3),x(j)]-z[s(3),x(i)]>=dz$

3. Условие обеспечения зон обслуживания аппаратов

ЕСЛИ $x(i)=um(m)$ И $x(j)=um(m)$, ТО

$$(z[s(1),x(i)]-z[s(5),x(i)]-z[s(11),x(i)]>z[s(1),x(j)]+z[s(5),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(1),x(i)]+z[s(5),x(i)]+z[s(8),x(i)]<z[s(1),x(j)]-z[s(5),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(2),x(i)]-z[s(6),x(i)]-z[s(12),x(i)]>z[s(2),x(j)]+z[s(6),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(2),x(i)]+z[s(6),x(i)]+z[s(9),x(i)]<z[s(2),x(j)]-z[s(6),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(3),x(i)]-z[s(7),x(i)]-z[s(13),x(i)]>z[s(3),x(j)]+z[s(7),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(3),x(i)]+z[s(7),x(i)]+z[s(10),x(i)]<z[s(3),x(j)]-z[s(7),x(j)] \text{ И}$$

$$(z[s(1),x(i)]-z[s(5),x(i)]>z[s(1),x(j)]+z[s(5),x(j)]+z[s(8),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$$z[s(1),x(i)]+z[s(5),x(i)]<z[s(1),x(j)]-z[s(5),x(j)]-z[s(11),x(j)] \text{ ИЛИ}$$

$z[s(2),x(i)]-z[s(6),x(i)]>z[s(2),x(j)]+z[s(6),x(j)]+z[s(9),x(j)]$ ИЛИ
 $z[s(2),x(i)]+z[s(6),x(i)]<z[s(2),x(j)]-z[s(6),x(j)]-z[s(12),x(j)]$ ИЛИ
 $z[s(3),x(i)]-z[s(7),x(i)]>z[s(3),x(j)]+z[s(7),x(j)]+z[s(10),x(j)]$ ИЛИ
 $z[s(3),x(i)]+z[s(7),x(i)]<z[s(3),x(j)]-z[s(7),x(j)]-z[s(13),x(j)]$

4. Условие размещения аппаратов внутри цеха

ЕСЛИ $x(i)=um(m)$, ТО

$z[s(1),x(i)]+0.5*z[s(5),x(i)]<z[s(16),um(m)]+z[s(19),um(m)]$ И

$z[s(2),x(i)]+0.5*z[s(6),x(i)]<z[s(17),um(m)]+z[s(20),um(m)]$ И

$z[s(3),x(i)]+0.5*z[s(7),x(i)]<z[s(18),um(m)]+z[s(21),um(m)]$ И

$z[s(1),x(i)]-0.5*z[s(5),x(i)]<z[s(16),um(m)]$ И

$z[s(2),x(i)]-0.5*z[s(6),x(i)]<z[s(17),um(m)]$ И

$z[s(3),x(i)]-0.5*z[s(7),x(i)]<z[s(18),um(m)]$

5. Условие непересечения аппаратов со строительными колоннами

ЕСЛИ $(z[s(1),x(i)]-0.5*z[s(5),x(i)]<z[s(1),x(i)]*z[s(23),um(m)]/z[s(23),um(m)]$

$+0.5*z[s(24),um(m)]$ И $z[s(1),x(i)]+0.5*z[s(5),x(i)]<(z[s(1),x(i)]+$

$z[s(23),um(m)]) *z[s(23),um(m)]/z[s(23),um(m)]-0.5*z[s(24),um(m)])$ ИЛИ

$(z[s(2),x(i)]-0.5*z[s(6),x(i)]<z[s(2),x(i)]*z[s(22),um(m)]/z[s(22),um(m)]$

$+0.5*z[s(25),um(m)]$ И $z[s(2),x(i)]+$

$0.5*z[s(6),x(i)]<(z[s(2),x(i)]+z[s(22),um(m)])*z[s(22),um(m)]/z[s(22),um(m)]-$

$0.5*z[s(25),um(m)])$, ТО $x(i)=um(m)$

6. Условие ограничения минимального расстояния между аппаратами

ЕСЛИ $x(i)=um(m)$ И $x(j)=um(m)$, ТО

$|z[s(1),x(i)]-z[s(1),x(j)]|+|z[s(2),x(i)]-z[s(2),x(j)]|+|z[s(3),x(i)]-z[s(3),x(j)]|>=1.5$

7. Условие размещения крупногабаритных аппаратов по этажам

ЕСЛИ $z[s(7),x(i)] > z[s(21),um(m)]$ И $z[s(17),um(m)] = 0$, ТО $x(i) = um(m)$

8. Условие размещения крупногабаритных аппаратов через перекрытие

ЕСЛИ $x(i) = um(m)$ И $z[s(7),x(i)] > z[s(21),um(m)]$, ТО

$z[s(1),x(i)] + 0.5 * z[s(5),x(i)] < z[s(16),um(m)] + z[s(19),um(m)]$ И

$z[s(2),x(i)] + 0.5 * z[s(6),x(i)] < z[s(17),um(m)] + z[s(20),um(m)]$ И

$z[s(1),x(i)] - 0.5 * z[s(5),x(i)] < z[s(16),um(m)]$ И

$z[s(2),x(i)] - 0.5 * z[s(6),x(i)] < z[s(17),um(m)]$

9. Условие группировки аппаратов по типу

ЕСЛИ $z[s(15),x(i)] = z[s(15),x(j)] < \dots$ И $x(i) = um(m)$, ТО $x(j) = um(m)$

Каждое из этих ограничений должно выполняться для каждого аппарата и каждой области размещения. Так как количество таких ограничений велико, то для краткости использованы индексы.

Графически структуру объекта (рисунок 4.10) при постановке задачи компоновки можно отобразить в виде N-ориентированного гиперграфа, у которого ребра u_1 и u_2 не содержат вершин, так как принадлежность вершин ребрам следует определить в процессе решения задачи.

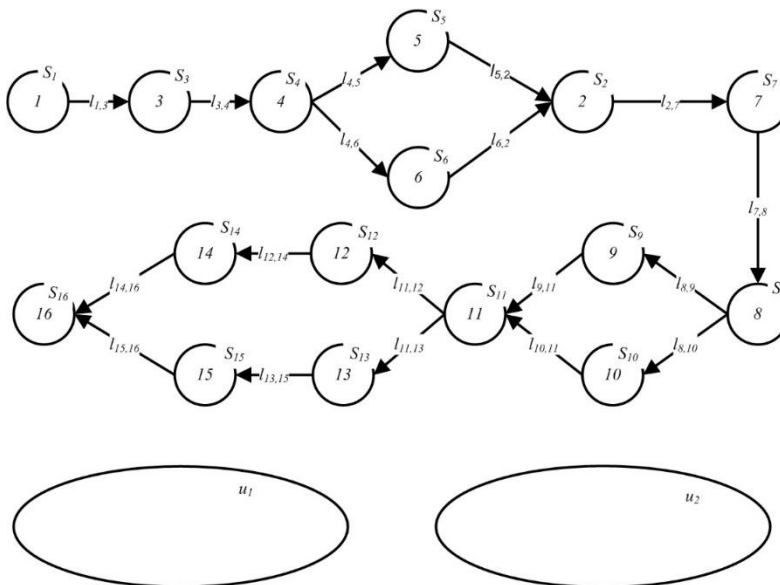


Рисунок 4.10 – Графическое отображение структуры объекта при постановке задачи

С помощью разработанного комплекса программ получен допустимый вариант размещения оборудования. 3d-модель показан на рисунке 4.11. N-ориентированный гиперграф, соответствующий этому варианту решения примет вид, показанный на рисунке 4.12.

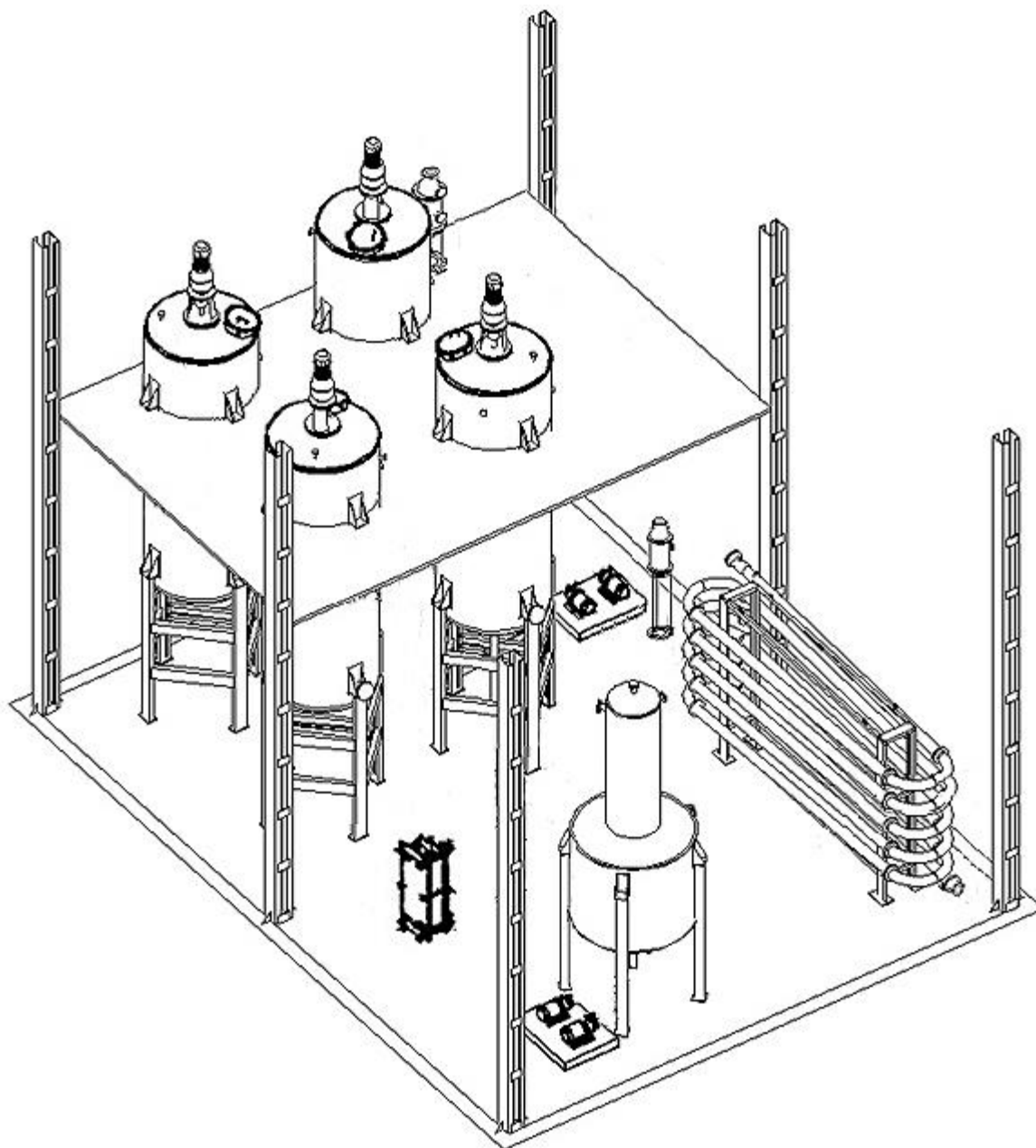


Рисунок 4.11 – 3D-модель полученного варианта размещения оборудования отделения механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья

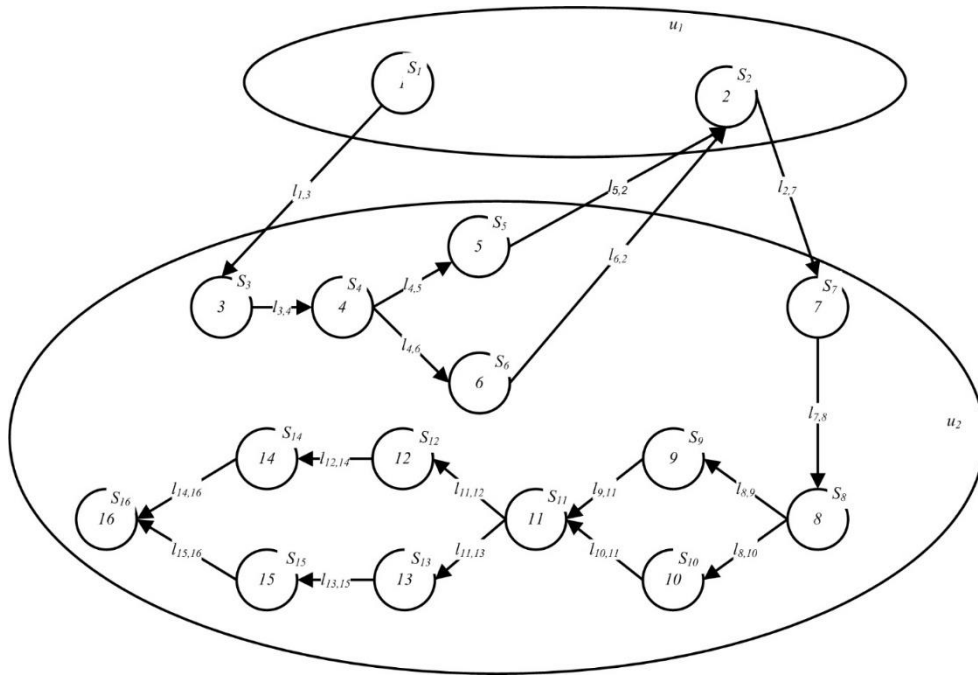


Рисунок 4.12 – N-ориентированный гиперграф, соответствующий допустимому варианту размещения

Данный вариант компоновки полностью соответствует проектным решениям, полученным ранее традиционным способом. При этом время получения проектного решения при использовании программного комплекса построения математической модели компоновки промышленных объектов составило 4 дня. На решение задачи без применения данного программного комплекса затрачено 35 дней с учетом разработки и отладки программного обеспечения. Таким образом, применение программного комплекса построения математической модели компоновки промышленных объектов позволяет снизить время, затрачиваемое на получение проектного решения, и упростить модификацию системы для решения различных задач компоновки, за счет возможности добавления и изменения условий математической модели без изменения программного кода.

Выводы к Главе 4:

1. Предложена структура системы проектирования компоновки промышленных объектов, отличающаяся применением экспертной системы для формирования и контроля ограничений при проектировании компоновки промышленных объектов.

2. Предложена структура экспертной системы контроля ограничений, включающая блоки формирования и управления системой ограничений, а также библиотеку расчетов.

3. Рассмотрен пример применения разработанного подхода для математического моделирования компоновки отделения механико-ферментативной обработки крахмалистого сырья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования разработан подход к математическому моделированию компоновки промышленных объектов, основанный на применении N -ориентированных гиперграфов для описания структуры технической системы, методах и алгоритмах автоматизированного формирования ограничений моделей и их учета при решении задач компоновки. Данный подход применим для решения круга задач компоновки промышленных объектов, таких как объекты химического производства, машиностроения, пищевой и легкой промышленности в цехах как ангарного, так и многоэтажного типа. Также с применением данного подхода возможно решение задачи компоновки промышленного объекта, состоящего из нескольких цехов. Разработанная в рамках данного подхода обобщенная структура математической модели компоновки промышленных объектов учитывает, как структуру моделируемого объекта, так и множество параметров размещаемых объектов, характеристик областей размещения, параметров технологических соединений. При этом эти множества могут быть расширены за счет добавления новых значимых параметров и характеристик и указания их области допустимых значений. Общая форма записи ограничений в обобщенной структуре математической модели позволяет формализовать все необходимые для решения задачи ограничения.

Предложенные в работе процедуры метода формирования и контроля ограничений позволили применить механизмы экспертных систем для учета ограничений в процессе улучшения решения. Применение экспертных систем дало возможность, во-первых, использовать для формирования ограничений экспертные знания, а во-вторых, добавлять новые ограничения без изменения программного кода. Это приводит к расширению круга задач, решаемого с помощью данного подхода.

Внедрение программного комплекса на реальном предприятии позволит ускорить получение проектных решений, как при проектировании новых

промышленных объектов, так и при модернизации существующих, с учетом необходимых стандартов, норм и правил.

Основные выводы и результаты работы:

1. Разработан подход к математическому моделированию компоновки промышленных объектов, основанный на применении обобщенной структуры математической модели и метода автоматизированного формирования ограничений модели и их учета при решении задач компоновки и позволяющий снизить время, затрачиваемое на постановку и решение задачи.

2. Разработана обобщенная структура математической модели компоновки промышленных объектов, основанная на применении N-ориентированных гиперграфов для моделирования структуры технической системы и позволяющая формализовать запись ограничений, заданных в виде экспертной информации, через ограничения значений свойств объектов, областей размещения, технологических соединений.

3. Разработан метод формирования и контроля выполнения ограничений в задачах компоновки, позволяющий добавлять и учитывать ограничения, обусловленные спецификой решаемых задач, требованиями нормативных документов, технологическими требованиями и пр. с использованием аппарата экспертных систем

4. Предложенная модернизированная методика решения задачи компоновки промышленных объектов позволяет осуществлять постановку и решение задачи компоновки промышленных объектов с использованием разработанного комплекса программ.

5. На основе предложенного подхода, а также структуры автоматизированной системы проектирования компоновки промышленных объектов, разработан комплекс программ формирования и контроля в задачах компоновки, позволяющий осуществлять постановку и решение широкого круга задач компоновки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Борисов, Д. Autodesk Building Systems 2004 / Д. Борисов // Журнал CADmaster. – 2004. – N 1. – С.75 – 77.
2. Егоров С.Я. Опыт разработки электронной графической справочной системы по технологическому оборудованию и ее использование в учебном процессе /С.Я. Егоров, В.Г. Мокрозуб, В.А. Немтинов// Информационные технологии. – 1999. – № 8. – С. 35 – 37.
3. Егоров, А.Ф. Оптимальный выбор типового оборудования при проектировании многоассортиментных химических производств / А.Ф. Егоров, В.П. Бельков, Н.С. Тюрина // Химическая промышленность. – 2001. – Т. 78. – № 2. – С. 40 –45.
4. Егоров, С.Я. Методология автоматизированного поиска объемно-планировочных решений химических производств / С.Я. Егоров // Химическая промышленность сегодня. – 2006. – № 10. – С. 35 – 54.
5. Егоров, С.Я. Аналитические и процедурные модели компоновки оборудования промышленных производств: Монография. / С.Я. Егоров // – М.: Издательство "Машиностроение", 2007. – 104 с.
6. Егоров, С.Я. Информационно-логическая модель компоновки промышленных объектов: / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов, М.С. Громов // Научно-техническая информация. –2006, – серия 2. – №4. – С. 19 – 23
7. Зайцев, И.Д. Моделирование процессов автоматизированного химико-технологического проектирования / И.Д. Зайцев.// – Л. : Химия Ленинградское отделение, 1976. – 184 с.
8. Зайцев, И.Д. Теория и методы автоматизированного проектирования химических производств / И.Д. Зайцев. – Киев : Наукова думка, 1981. – 308 с.
9. Карпушкин С.В. Система выбора аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств / С.В. Карпушкин, М.Н.

Краснянский, А.Б. Борисенко // Информационные технологии. – 2004. – № 10. – № 10. – С. 14 – 19.

10. Карпушкин, С.В. Выбор аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств / С.В. Карпушкин.// – М. : Машиностроение-1, 2006. – 140 с.

11. Кафаров, В.В Алгоритм оптимального размещения в объеме цеха с использованием метода ветвей и границ / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Б.Б. Богомоллов // Теорет. основы. хим. технологии. – 1982 – №1 – С.83–89.

12. Кафаров, В.В. Основы автоматизированного проектирования химических производств / В.В. Кафаров, В.Н. Ветохин.// – М: Наука, 1987. – 623 с.

13. Кафаров, В.В. Эвристическо-топологические методы автоматизированного конструкционного проектирования химических производств / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин // Методы кибернетики хим. – технол. процессов : тез. докл. Всесоюз. конф. – М., 1984. – С. 156 – 158.

14. Кушко, В. Внедрение системы TechnologiCS / В. Кушко, А. Петренко // Журнал CADmaster. – 2004. – № 3. – С. 13 – 19.

15. Малыгин, Е.Н Математическое моделирование и оптимизация процесса компоновки оборудования химико-технологических схем / Е.Н. Малыгин, В.А. Немтинов, В.Г. Мокрозуб, С.Я. Егоров // Математические методы в химии и химической технологии: Тез. докл. Междунар. конф – Тверь, 1995. – Ч. 2. – С.100.

16. Малыгин, Е.Н. Автоматизация проектирования компоновок химико-технологических схем / Е.Н. Малыгин, С.Я. Егоров // Реахмитехника–2 : тез. докл. Всесоюз. конф. – Днепропетровск, 1985. – С. 63.

17. Мелихов, А.Н. Применение графов для проектирования дискретных устройств / А.Н.Мелихов, Л.С. Берштейн, В.М. Курейчик.// – М., 1974. – 304 с.

18. Мокрозуб, В.Г. Применение N-ориентированных гиперграфов и реляционных баз данных для структурного и параметрического синтеза

технических систем. /В.Г. Мокрозуб, В.А. Немтинов, В.С. Мордвин, А.А. Илясов.// Прикладная информатика. 2010. № 4. С. 115-122.

19. Мокрозуб, В.Г. Программное обеспечение автоматизированных систем размещения объектов в пространстве инвариантное к предметной области. /В.Г. Мокрозуб, К.А. Шаронин, К.В. Немтинов//. Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы. 2012. № 3. – С. 11-29

20. Овчинников, В. А. Применение операций над гиперграфами для компоновки схем ЭВМ. /В.А. Овчинников, А.А. Пламядялов// Наука и образование: электронное научное издание. 2011. №7. С. 1-9.

21. Павлов, В.В. О математическом моделировании дискретного производства. Наука и образование: электронное научное издание. 2005. №6

22. Павлов, В.В. Полихроматические множества в теории систем. Операции над ПIS-множествами. Наука и образование: электронное научное издание. 2005. №7

23. Павлов, В.В. Структурное моделирование в CALS-технологиях. Ин-т конструкторско-технологической информатики РАН. М.: Наука, 2006.

24. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. - М.:Мир, 1975. - 534 с.

25. Aiello, G. An integrated approach to the facilities and material handling system design. /Aiello G., Enea M., Galante G.// International Journal of Production Research, 40(15), 2002. – p.4007–4017.

26. Aiello, G. Multi-objective approach to facility layout problem by genetic search algorithm and Electre method. /Aiello G., Enea M., Galante G.// Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 22, 2006. – p.447–455.

27. Armour, G. C. A heuristic algorithm and simulation approach to relative allocation of facilities. /Armour G. C., Buffa E. S.// Management Science, 9(2), 1963. – p.294–300.

28. Azadivar, F. Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. /Azadivar F., Wang J.// International Journal of Production Research, 38(17), 2000. – p.4369–4383.
29. Balakrishnan, J. Genetic search and the dynamic layout problem. /Balakrishnan J., Cheng C. H.// Computers & Operations Research, 27(6), 2000. – p. 587–593.
30. Balakrishnan, J. FACOPT: A user friendly FACility layout OPTimization system. /Balakrishnan J., Cheng C. H., Wong K. F.// Computers & Operations Research, 30(11), 2003. – p. 1625–1641.
31. Balakrishnan, J. A hybrid genetic algorithm for the dynamic plant layout problem. /Balakrishnan J., Cheng C. H., Conway D. G., Lau C.M.// International Journal of Production Economics, 86(2), 2003. – p. 107–120.
32. Baykasoglu, A. A simulated annealing algorithm for dynamic layout problem. /Baykasoglu A., Gindy N. N. Z.// Computers & Operations Research, 28(14), 2001. – p.1403–1426.
33. Baykasoglu, A. A simulated annealing algorithm for dynamic layout problem. /Baykasoglu A., Gindy N. N. Z.// Computers & Operations Research, 28(14), 2001. – p.1403–1426.
34. Baykasoglu, A. An ant colony algorithm for solving budget constrained and unconstrained dynamic facility layout problems. /Baykasoglu A., Dereli T., Sabuncu I.// Omega, 34(4), 2006. – p.385–396.
35. Bock, S. Detailed layout planning for irregularly-shaped machines with transportation path design. /Bock S., Hoberg K.// European Journal of Operational Research, 177, 2007. – p.693–718.
36. Bozer, Y. A. An improvement-type layout algorithm for single and multiple floor facilities. /Bozer Y. A., Meller R. D., Erlebacher S. J.// Management Science, 40(7), 1994. – p.918–932.

37. Braglia, M. Optimization of a simulated-annealing-based heuristic for single row machine layout problem by genetic algorithm. *International Transactions in Operational Research*, 3(1), 1996. – p. 37–49.
38. Braglia, M. Layout design in dynamic environments: Strategies and quantitative indices. /Braglia M., Zanoni S., Zavanella L.// *International Journal of Production Research*, 41(5), 2003. – p.995–1016.
39. Chaieb, I. Conception et exploitation des systemes de production flexibles manufacturiere `res: Introduction des ta ^ches de transport. Ph.D. dissertation (in French). France: Specialite ´en productique automatique et informatique industrielle, Ecole centrale de Lille. 2002.
40. Chen, C. W. Heuristic approach for solving the multi-objective facility layout problem. /Chen C. W., Sha D. Y.// *International Journal of Production Research*, 43(21), 2005. – p.4493–4507.
41. Chen, D. S. Linear sequencing for machine layouts by a modified simulated annealing. /Chen D. S., Wang Q., Chen H. C.// *International Journal of Production Research*, 39(8), 2001. – p.1721–1732.
42. Cheng, R. Loop layout design problem in flexible manufacturing systems using genetic algorithms. /Cheng R., Gen M.// *Computers & Industrial Engineering*, 34(1), 1998. – p. 53–61.
43. Cheng, R. Genetic algorithms for designing loop layout manufacturing systems. /Cheng R., Gen M., Tosawa T.// *Computers & Industrial Engineering*, 31(3-4), 1996. – p. 587–591.
44. Chiang, W. C. An improved tabu search heuristic for solving facility layout design problems. /Chiang W. C., Kouvelis P. // *International Journal of Production Research*, 34(9), 1996. – p. 2565–2585.
45. Chittratanawat, S. An integrated approach for facility layout, P/D location and material handling system design. /Chittratanawat S., Noble J. S.// *International Journal of Production Research*, 37(3), 1999. – p. 683–706.

46. Chung, Y. K. A neuro-based expert system for facility layout construction. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10(5), 1999. – p. 359–385.
47. Chwif, L. A solution to the facility layout problem using simulated annealing. /Chwif L., Pereira Barretto M. R., Moscato L. A.// *Computers in Industry*, 36(1–2), 1998. – p. 125–132.
48. Co, H. C. A throughput-maximizing facility planning and layout model. /Co H. C., Wu A., Reisman A.// *International Journal of Production Research*, 27(1), 1989. – p. 1–12.
49. Das, S. K. A facility layout method for flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 31(2), 1993. – p. 279–297.
50. Devise, O. Indicators for measuring performances of morphology and materials handling systems. /Devise, O., Pierreval A.// *International Journal of Production Economics*, 64(1–3), 2000. – p. 209–218.
51. Dilworth, J. B. *Operation management*. McGraw Hill. 1996.
52. Djellab, H. A new heuristic procedure for the single-row facility layout problem. /Djellab H., Gourgand A.// *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 14(3), 2001. – p. 270–280.
53. Drezner, Z. A heuristic procedure for the layout of a large number of facilities. *International Journal of Management Science*, 33(7), 1987. – p. 907–915.
54. Dunker, T. A co-evolutionary algorithm for a facility layout problem. /Dunker T., Radonsb G., Westkampera E.// *International Journal of Production Research*, 41(15), 2003. – p. 3479–3500.
55. Dunker, T. Combining evolutionary computation and dynamic programming for solving a dynamic facility layout problem. /Dunker T., Radonsb G., Westkampera E.// *European Journal of Operational Research*, 165(1), 2005. – p. 55–69.
56. El-Baz, M. A. A genetic algorithm for facility layout problems of different manufacturing environments. *Computers & Industrial Engineering*, 47(2–3), 2004. – p. 233–246.

57. Enea, M. The facility layout problem approached using a fuzzy model and a genetic search. /Enea M., Galante G., Panascia E.// Journal of Intelligent Manufacturing. Volume 16, Issue 3, 2005. – p.303-316
58. Ertaya, T. Integrating data envelopment analysis and analytic hierarchy for the facility layout design in manufacturing systems. /Ertaya T., Ruanb D., Tuzkayac U.R.// Information Sciences. Volume 176, Issue 3, 2006. – p. 237–262
59. Evans, G. W. A layout design heuristic employing the theory of fuzzy sets. /Evans G. W., Wilhlem M. R., Karwowsky W.// International Journal of Production Research, 25, 1987. – p. 1431–1450.
60. Ficko, M. Designing the layout of single- and multiple-rows flexible manufacturing system by genetic algorithms. /Ficko M., Brezocnick M., Balic J.// Journal of Materials Processing Technology, 2004. – p. 150–158.
61. Fruggiero, F. Design and optimization of a facility layout problem in virtual environment. /Fruggiero F., Lambiase A., Negri F.// In Proceeding of ICAD, 2006. – p.2206–2228.
62. Grobeiny, J. The fuzzy approach to facility layout problems. Fuzzy Sets and Systems, 23, 1987. – p. 175–190.
63. Grobelny, J. On one possible ‘fuzzy’ approach to facility layout problems. International Journal of Production Research, 25, 1987. – p. 1123–1141.
64. Hamann, T. The intra cell layout problem in automated manufacturing system. /Hamann T., Vernadat F.// 8th international Conference on CAD/CAM, robotics and factory of the future (CARs & FOF 92), 1992.
65. Hassan, M.M.D. Machine layout problem in modern manufacturing facilities. International Journal of Production Research, 32(11), 1994. – p.2559–2584.
66. Hassan, M.M.D. SHAPE: A construction algorithm for area placement evaluation. /Hassan M.M.D., Hogg G. L., Smith D. R. // International Journal of Production Research, 24(5), 1986. – p. 1283–1295.
67. Heragu, S.S. Machine layout problem in flexible manufacturing systems. /Heragu S. S., Kusiak A.// Operations Research, 36(2), 1988. – p. 258–268.

68. Heragu, S. S. Machine layout: An optimization and knowledge-based approach. /Heragu S. S., Kusiak A.// *International Journal of Production Research*, 28, 1990. – p. 615–635.
69. Heragu, S. S. Efficient models for the facility layout problem. /Heragu S. S., Kusiak A.// *European Journal of Operational Research*, 53(1), 1991. – p.1–13.
70. Johnson, R. V. SPACECRAFT for multi-floor layout planning. *Management Sciences*, 28(4), 1982. – p. 407–417
71. Khalil, T. M. Facilities relative allocation technique (FRAT). *International Journal of Productions Research*, 11(2), 1973. – p. 183–194.
72. Kim, C. B. Assignment problems in single-row and double-row machine layouts during slow and peak periods. /Kim C. B., Kim S. S., Bobbie L. F.// *Computers & Industrial Engineering*, 30(3), 1996. – p. 411–422.
73. Kim, J. G. A branch and bound algorithm for locating input and output points of departments on the block layout. /Kim J. G., Kim Y. D.// *Journal of the operational research society*, 50(5), 1999. – p. 517–525.
74. Kim, J. G. Layout planning for facilities with fixed shapes and input and output points. /Kim J. G., Kim Y. D.// *International Journal of Production Research*, 38(18), 2000. – p.4635–4653.
75. Kim, J. Y. Graph theoretic heuristics for unequal-sized facility layout problems. /Kim J. Y., Kim Y. D.// *Omega*, 23(4), 1995. – p.391–401.
76. Kochhar, J. S. MULTI-HOPE: A tool for multiple floor layout problems. /Kochhar J. S., Heragu S. S.// *International Journal of Production Research*, 36(12), 1998. – p.3421–3435.
77. Koopmans, T. C. Assignment problems and the location of economic activities. /Koopmans T. C., Beckmann M.// *Econometrica*, 25(1), 1957. – p. 53–76.
78. Kouvelis, P. Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing systems. /Kouvelis P., Kurawarwala A. A., Gutierrez G. J.// *European Journal of Operations Research*, 63(2), 1992. – p.287–303.

79. Kouvelis, P. Unidirectional loop network layout problem in automated manufacturing systems. /Kouvelis P., Kim M.W.// *Operations Research*, 40, 1992. – p. 533–550.
80. Kumar, K. R. A heuristic procedure for the single-row facility layout problem. /Kumar K. R., Hadjinicola G. C., Lin T. L.// *European Journal of Operational Research*, 87(1), 1995. – p. 65–73.
81. Kumara, S.R.T. Expert System for industrial facilities layout planning and analysis. /Kumara S.R.T., Kashyap R.L., Moodie C.L.// *Computers & Industrial Engineering*. Volume 12, Issue 2, 1987. – p.143–152
82. Lacksonen, T. A. Preprocessing for static and dynamic facility layout problems. *International Journal of Production Research*, 35(4), 1997. – p.1095–1106.
83. Lee, G. C. Algorithms for adjusting shapes of departments in block layouts on the grid-based plane. /Lee G. C., Kim Y. D.// *Omega*, 28(1), 2000. – p.111–122.
84. Lee, K. Y. An improved genetic algorithm for multi-floor facility layout problems having inner structure walls and passages. /Lee K. Y., Roh M. I., Jeong H. S.// *Computers & Operations Research*, 32(4), 2005. – p. 879–899
85. Lee, R. CORELAP-computerized relationship layout planning. /Lee R., Moore J. M.// *The Journal of Industrial Engineering*, 18, 1967. – p. 195–200.
86. Lee, Y. H. A shape-based block layout approach to facility layout problems using hybrid genetic algorithm. /Lee Y. H., Lee M. H.// *Computers & Industrial Engineering*, 42, 2002. – p.237–248.
87. Leung, J. A graph-theoretic heuristic for flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 57(2), 1992. – p.243–252.
88. Mahdi, A. H. Physical layout with minimization of the transport cost (Research Internal Report). /Mahdi A. H., Amet H., Portman M. C.// Nancy, France: LORIA. 1998.
89. Matsuzaki, K. Heuristic algorithm to solve the multi-floor layout problem with the consideration of elevator utilization. /Matsuzaki K., Takashi I., Yoshimoto K.// *Computers & Industrial Engineering*, 36(2), 1999. – p. 487–502.

90. McKendall, A. R. Hybrid ant systems for the dynamic facility layout problem. /McKendall A. R., Shang J.// *Computers & Operations Research*, 33(3), 2006. – p.790–803.
91. McKendall, A. R. Simulated annealing heuristics for the dynamic facility layout problem. /McKendall A. R., Shang J., Kuppusamy S.// *Computers & Operations Research*, 33(8), 2006. – p.2431–2444.
92. Meller, R. D. A new simulated annealing algorithm for the facility layout problem. /Meller R. D., Bozer Y. A.// *International Journal of Production Research*, 34, 1996. – p. 1675–1692.
93. Meller, R. D. Alternative approaches to solve the multi-floor facility layout problem. /Meller R. D., Bozer Y. A.// *Journal of Manufacturing Systems*, 16(3), 1997. – p. 192–203.
94. Meller, R. D. Optimal facility layout design. /Meller R. D., Narayanan V., Vance P. H.// *Operations Research Letters*, 23(3–5), 1999. – p. 117–127.
95. Meller, R.D. The facility layout problem: Recent and emerging trends and perspectives. /Meller R.D., Gau K.Y.// *Journal of Manufacturing Systems*. Volume 15, Issue 5, 1996. – p.351–366
96. Meng, G. Reconfigurable layout problem. /Meng G., Heragu S.S., Zijm H.// *International Journal of Production Research*, 42(22), 2004. – p.4709–4729.
97. Mir, M. A hybrid optimization approach for layout design of unequal-area facilities. /Mir M., Imam M. H.// *Computers & Industrial Engineering*, 39(1–2), 2001. – p.49–63.
98. Nearchou, A. C. Meta-heuristics from nature for the loop layout design problem. *International Journal of Production Economics*, 101(2), 2006. – p.312–328.
99. Page, A. L. New product development survey: Performance, and best practices. PDMA Conference. 1991.
100. Palubeckis, G. A branch-and-bound algorithm for the single-row equidistant facility layout problem. *OR Spectrum*. Volume 34, Issue 1, 2012. – p.1-21.

101. Patsiatzis, D. I. Optimal multi-floor process plant layout. /Patsiatzis D. I., Papageorgiou L. G.// Computers and Chemical Engineering, 26(4–5), 2002. – p.575–583.
102. Pierreval, H. Evolutionary approaches to the design and organization of manufacturing systems. /Pierreval H., Caux C., Paris J.L., Viguier F.// Computers & Industrial Engineering, 44(3), 2003. – p.339–364.
103. Potts, C. N. Workload balancing and loop layout in the design of a flexible manufacturing system. /Potts C.N., Whitehead J.D.// European Journal of Operational Research, 129(2), 2001. – p.326–336.
104. Proth, J. M. Conception et gestion des systé `mes de production. Presses Universitaires de France, 1992. – p.68–77.
105. Raoot, A. D. A ‘fuzzy’ approach to facilities layout planning. / Raoot A. D., Rakshit A.// International Journal of Production Research, 29, 1991. – p.835–857.
106. Rosenblatt, M. J. The dynamics of plant layout. Management Science,32(1), 1986. – p.76–86.
107. Seehof, J. M. Automated layout design program. /Seehof J. M., Evans W. O.// The Journal of Industrial Engineering, 18, 1967. – p.690–695.
108. Shayan, E. Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure. /Shayan E., Chittilappilly A.// International Journal of Production Research, 42(19), 2004. – p.4055–4067.
109. Singh, S. P. A review of different approaches to the facility layout problems. /Singh S. P., Sharma R. R. K.// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume 30, Issue 5-6, 2006. – p.425-433
110. Solimanpur, M. An ant algorithm for the single row layout problem in flexible manufacturing systems. /Solimanpur M., Vrat P., Shankar R.// Computers & Operations Research, 32(3), 2005. – p. 583–598.
111. Tam, K.Y. Solving facility layout problems with geometric constraints using parallel genetic algorithms: Experimentation and findings. /Tam K.Y., Chan S.K.// International Journal of Production Research, 36(12), 1998. – p.3253–3272.

112. Tompkins, J.A. An applied model for the facilities design problem. /Tompkins J.A., Reed J.R.// *International Journal of Production Research*, 14, 1976. – p.583–595.
113. Tompkins, J.A. Facilities planning. /Tompkins, J.A., White J.A., Bozer Y.A., Frazelle E.H., Tanchoco J.M., Trevino J.// New York: Wiley, 1996.
114. Tsuchiya, K. A neural network approach to facility layout problems. /Tsuchiya K., Bharitkar S., Takefuji Y.// *European Journal of Operational Research*, 89(3), 1996. – p.556–563.
115. Van Camp, D.J. A nonlinear optimization approach for solving facility layout problems. /Van Camp D.J., Carter M.W., Vannelli A.// *European Journal of Operational Research*. Volume 57, Issue 2, 1992. – p.174–189.
116. Wang, M. J. A solution to the unequal area facilities layout problem by genetic algorithm. /Wang M.J., Hu M.H., Ku M.H.// *Computers in Industry*, 56(2), 2005. – p.207–220.
117. Welgama, P. S. A construction algorithm for the machine layout problem with fixed pick-up and drop-off points. /Welgama P.S., Gibson P.R.// *International Journal of Production Research*, 31(11), 1993. – p.2575–2590.
118. Wu, Y. The optimization of block layout and aisle structure by a genetic algorithm. /Wu Y., Appleton E.// *Computers & Industrial Engineering*, 41(4), 2002. – p.371–387.
119. Yang, T. A hierarchical AHP/DEA methodology for the facilities layout design problem. /Yang T., Kuo C.// *European Journal of Operational Research*, 147, 2003. – p.128–136.
120. Yang, T. Layout design for flexible manufacturing systems considering single-loop directional flow patterns. /Yang T., Peters B.A., Tu M.// *European Journal of Operational Research*, 164(2), 2005. – p.440–455.
121. Zhou, J. Facility layout based on sequence analysis: Design of flowshops. /Zhou J., Wu Z.M.// *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. Volume 14, Issue 6, 2009. – p.686–689.

Приложение А

Справка о внедрении на предприятии



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВПО «ТГТУ»)

392000, Тамбов, ул. Советская, 106
Телефон (4752) 63-10-19, факс (4752) 63-06-43, E-mail: tstu@admin.tstu.ru
Лиц. №1625 сер. ААА №001693 выд. Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки 05.08.2011г.
ИНН 6831006362, ОКПО 02069289

УТВЕРЖДАЮ

Проректор ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по
научно-инновационной деятельности

Краснянский М.Н.

20__ г.



СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы аспиранта дневной формы обучения ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» К.А. Шаронина

Полученные в диссертационной работе К.А. Шаронина результаты, а именно:

- подход к математическому моделированию компоновки промышленных объектов;
- метод формирования и контроля ограничений в задачах компоновки, включающий процедуры формирования ограничений, их контроля и получения допустимого начального варианта компоновки с использованием экспертной информации;
- методика решения задачи компоновки с использованием разработанных процедур метода формирования и контроля ограничений;
- комплекс прикладных программ, реализующих предложенные методы, используются при выполнении лабораторных работ, курсовых и дипломных проектов студентами специальности 151701 - «Проектирование технологических машин и комплексов», направления подготовки бакалавров 150700 - «Машиностроение».

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированное проектирование технологического оборудования» ФГБОУ ВПО «ТГТУ» под руководством д.т.н., Егорова С.Я.

Заведующий кафедрой АПТО
д.т.н., профессор

Немтинов В.А.

Приложение Б

Справка о внедрении на предприятии



**Общество с ограниченной ответственностью
«ЭНЕРГОТЕХПРОЕКТ»**

392000, г. Тамбов, бульвар Строителей, 6а.
ИНН 6829048076 КПП 682901001 ОГРН 1086829007760
тел./факс: (4752)63-31-23, тел.: 63-31-20,
e-mail: etp-tambov@mail.ru сайт: www.etpcompany.ru

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы аспиранта ФГБОУ
ВПО «Тамбовский государственный технический университет»
К.А. Шаронина

Полученные в диссертационной работе К.А. Шаронина результаты, а именно:

- метод формирования и контроля ограничений в задачах компоновки, включающий процедуры формирования ограничений, их контроля и получения допустимого начального варианта компоновки с использованием экспертной информации;

- методика решения задачи компоновки с использованием разработанных процедур метода формирования и контроля ограничений;

- комплекс прикладных программ, реализующих предложенные методы переданы в ООО «Энерготехпроект», прошли производственные испытания и приняты к использованию при разработке и контроле проектов технических объектов. Благодаря использованию представленных результатов, удалось повысить качество проектов, а также снизить время их разработки, что повысило эффективность работы компании. Ожидаемый эффект от внедрения программного обеспечения составляет 150 000 руб.

Генеральный директор



Королев С.В

Приложение В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013611013

Автоматизированная система поддержки принятия проектных
решений по компоновке промышленных объектов

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Тамбовский государственный технический
университет» (RU)*

Автор(ы): *Шаронин Кирилл Анатольевич, Егоров Сергей
Яковлевич, Немтинов Кирилл Владимирович, Абрамов
Станислав Вячеславович (RU)*

Заявка № 2012619930

Дата поступления 19 ноября 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
9 января 2013 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

