

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

Кафедра «Системы автоматики, автоматизированное управление и  
проектирование»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ С.В. Ченцов  
«\_\_\_\_» июня 2018 г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

### ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ПОЛЕВОГО УРОВНЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АСУ ТП

Направление 27.04.04 Управление в технических системах

Магистерская программа 27.04.04.01 Интегрированные системы управления  
производством

Научный руководитель	_____	.06.2018	доц., канд. техн. наук Е.Е. Носкова
Выпускник	_____	.06.2018	Д.А. Шапрун
Рецензент	_____	.06.2018	доц., канд. техн. наук Е.П. Моргунов
Нормоконтролер	_____	.06.2018	Т.А. Грудинова

Красноярск 2018

## **РЕФЕРАТ**

Выпускная квалификационная работа на тему "Формализация выбора оборудования полевого уровня при проектировании АСУ ТП" содержит 84 страницы текстового документа, 29 рисунков, 15 таблиц, 27 использованных источников, 1 приложение.

**АСУ ТП, ТЗ, ТОУ, ППР, ЛПР, ПОЛЕВОЙ УРОВЕНЬ, ИНДЕКС СОГЛАСИЯ, МАТРИЦА СОГЛАСИЯ, ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ.**

Цель работы: Разработать методологию решения задачи синтеза структуры АСУ ТП на полевом уровне, на базе современных методов проектирования сложных систем.

Задачи работы:

- исследование и анализ современных методов параметрического и структурного синтеза;
- выбор эффективного метода для формализации и алгоритмизации проектной процедуры синтеза при разработке АСУ ТП;
- адаптация метода морфологического анализа при решении задачи выбора оборудования АСУ ТП на полевом уровне;
- алгоритмическая реализация процедуры выбора полевого оборудования и т.д. (на полевом уровне);
- получение заданной структуры АСУ ТП в соответствии с требованиями ТЗ.

Общие результаты и выводы:

Разработанная методология может быть использована в процессе проектирования АСУ ТП полевого уровня с целью формирования множества структур АСУ ТП, удовлетворяющих требованиям ТЗ.

Предложенный подход к структурному синтезу АСУ ТП позволяет избегать типизирования ошибок в деятельности проектных организациях, обновление элементной базы, выбора наилучшего решения.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Информационная поддержка синтеза проектных решений при разработке АСУ ТП на полевом уровне.....	7
1.1 Задачи проектирования АСУ ТП на полевом уровне.....	9
1.2 Синтез проектных решений при разработке АСУ ТП.....	15
1.2.1 Задача принятия решений.....	17
1.2.2 Представление множества альтернатив.....	20
1.2.3 Морфологические таблицы.....	21
1.2.4 Альтернативные графы.....	23
1.2.5 Методы распространения ограничений.....	25
1.2.6 Выбор готовых прототипов.....	28
1.2.7 Построение частной структуры из общего.....	28
1.2.8 Метод сканирования (слепой поиск).....	32
1.2.9 Морфологический ящик.....	33
1.2.10 Задача блочного рюкзака.....	34
1.3 Развитие методов структурного синтеза.....	36
2 Метод морфологического анализа как подход к формализации проектного процесса синтеза при разработке АСУ ТП на полевом уровне.....	41
2.1 Представление АСУ ТП как совокупности моделей.....	41
2.2 Разработка морфологических деревьев средств автоматизации.....	44
2.3 Выбор полевого оборудования с использованием фрагментов И-ИЛИ деревьев.....	48
3 Принятие проектных решений при разработке АСУ ТП полевого уровня.....	52
3.1.Методы сравнения и оценки многокритериальных альтернатив в условиях определённости исходной информации.....	52
3.1.1Попарное сравнение.....	52
3.1.2 Лексикографический метод.....	52
3.1.3 Метод лексикографического полуупорядочивания.....	52
3.1.4 Метод перестановок.....	53

3.2 Методы, основанные на количественном выражении предпочтений ЛПР на множестве критериев.....	53
3.2.1 Метод простых приращений.....	53
3.2.2 Метод ЭЛЕКТРА 1.....	53
3.2.3 Метод ЭЛЕКТРА 2.....	54
3.2.4 Метод ЭЛЕКТРА 3.....	54
3.2.5 Метод аналитических иерархий.....	55
3.3 Методы, основанные на информации о допустимых значениях критериев.....	56
3.3.1 Задание минимально допустимых значений критериев.....	56
3.3.2 Анализ альтернатив только по критериям, для которых достигаются «наилучшие».....	56
3.4 Методы, не требующие ранжирования критериев.....	56
3.4.1 Критерий Харвица.....	56
3.4.2 Метод МАКСИМИН.....	57
3.4.3 Метод МАКСИМАКС.....	57
3.5 Методы принятия групповых решений.....	57
3.5.1 Метод Дельфи.....	57
3.5.2 Метод ранжирования альтернатив.....	58
3.5.3 Метод парных сравнений.....	58
3.5.4 Метод группового принятия решения с помощью кластеризации экспертных оценок альтернатив.....	58
3.6 Применение методов семейства Электра при выборе полевого оборудования.....	59
3.7 Апробация методологии выбора оборудования.....	64
3.8 Выбор типономинала полевого оборудования с применением семейства методов ЭЛЕКТРА.....	66
3.9 Сформированная структура.....	78
Заключение.....	80
Список использованных источников.....	81
Приложение А.....	84

## **ВВЕДЕНИЕ**

С целью сокращения сроков разработки автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) на промышленных объектах необходимо использовать инструменты автоматизированного проектирования. Это особенно актуально при выполнении задач параметрического и структурного синтеза при проектировании АСУ ТП полевого уровня, поскольку в настоящее время в инженерной практике отсутствуют способы, позволяющие по условиям технического задания (ТЗ) сразу же выбрать оптимальный набор средств автоматизации (СА). Сокращение сроков разработки проектной документации, ведет к использованию раннее применяющихся наборов СА для однотипных проектов, что со временем ведет к применению морально устарелого оборудования и необоснованной протекции определенных фирм – производителей СА, которые непосредственно повышают цены на выпускаемую продукцию.

Во избежание принятия ошибочных решений, ускорения времени проектирования в качестве информационного сопровождения этапа проектных работ необходимо иметь специализированное программное обеспечение, автоматизирующее процесс структурного синтеза.

Одним из походов к формализации и автоматизации проектных процедур параметрического и структурного синтеза является метод морфологического анализа, суть которого заключается в построении морфологического И/ИЛИ дерева, определяющего избыточную структуру АСУ ТП, в которой представлены все возможные варианты наборов средств автоматизации [1, 2].

Сужение пространства поиска оптимальной структуры АСУ ТП может быть достигнуто за счет разработки программного средства выбора средств автоматизации соответствующих ТЗ на проектирование АСУ ТП. Алгоритм работы программного средства базируется на анализе фрагментов И/ИЛИ дерева АСУ ТП полевого уровня, соответствующих средствам автоматизации определенного типа.

Цель работы: Разработать методологию решения задачи синтеза структуры АСУ ТП на полевом уровне, на базе современных методов проектирования сложных систем.

Задачи работы:

- исследование и анализ современных методов параметрического и структурного синтеза;
- выбор эффективного метода для формализации и алгоритмизации проектной процедуры синтеза при разработке АСУ ТП;
- адаптация метода морфологического анализа при решении задачи выбора оборудования АСУ ТП на полевом уровне;
- алгоритмическая реализация процедуры выбора полевого оборудования;
- получение заданной структуры АСУ ТП в соответствии с требованиями ТЗ.

**Научная новизна результатов** диссертационной работы состоит в следующем:

- На основе обобщенных структур в виде фрагментов И/ИЛИ деревьев Планируется построение будущего алгоритма для каталогизированного выбора комплектующих на основе типов и совместимости интерфейсов, а также оборудования и комплектующих АСУ ТП.
- Механизм выбора для построения системы инженером-проектировщиком, предоставляющий возможность конкретного выбора нужной конфигурации, и экономящий время и ресурсы для внедрения эффективной конфигурации в АСУ ТП производственного процесса.

**Практическая значимость** работы заключается в разработанном алгоритме, формализующем проектную процедуру синтеза структуры АСУ ТП полевого уровня на базе комбинирования И/ИЛИ – деревьев и пороговых методов принятия решения.

## **1 Информационная поддержка синтеза проектных решений при разработке АСУ ТП на полевом уровне**

Автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) – совокупность аппаратных и программных средств, позволяющих управлять определенной последовательностью рабочих операций в материальном производстве. АСУТП – человеко-машинная система управления, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимую для оптимизации управления в соответствии с принятым критерием. Критерием управления АСУ ТП является соотношение, характеризующее качество функционирования системы в целом, и принимающее конкретные числовые значения в зависимости от используемых управляющих воздействий, и уменьшение степени непосредственного участия человека в опасных и напряженных технологических операциях.[3]

Современные АСУ ТП на технологических предприятиях и заводах решают следующие задачи:

- оптимизация режимов работы оборудования;
- увеличение межремонтного периода и уменьшение простоев технологического оборудования;
- снижение затрат на ремонт оборудования;
- повышение производительности труда и условий работы персонала, занятого сбором и анализом информации.

Функции АСУТП подразделяются на информационные, управляющие и вспомогательные. Информационная функция АСУТП – это функция системы, содержанием которой является сбор, обработка и представление информации о состоянии технологического процесса оперативному персоналу или передача этой информации для последующей обработки. Управляющая функция АСУТП – это функция, результатом которой является выработка и реализация управляющих воздействий на технологический процесс.

К управляющим функциям АСУТП относятся:

- формирование и передача на исполнительные устройства управляющих сигналов;
- определение рационального режима технологического процесса;
- выдача оператору рекомендаций по управлению технологическим процессом.

Вспомогательные функции АСУТП – это функции, обеспечивающие решение внутренних задач. Вспомогательные функции системы предназначены, прежде всего, для обеспечения собственного функционирования АСУТП (обеспечение заданного алгоритма функционирования технических средств системы, контроль их состояния, хранение информации и т.п.). Основные функции, реализуемые в АСУТП, следующие:

Контроль технологических параметров, а также состояний вспомогательного оборудования (механизмом и приводных электродвигателей, режимов работы регуляторов, положение запорной арматуры, процент открытия регулирующих органов и т.п.) и отображение оператору в виде текущих цифровых значений в единицах параметра или трендов(графиков), регистрация параметров на рабочих станциях оператора и последующая передача их на сервер с заданной дискретностью, визуальная сигнализация и текстовое сообщение оператору, а также мигающая световая сигнализация с одновременной подачей звукового сигнала об отклонениях оперативных технологических параметров от их нормальных значений, а также неисправностях в системе управления.

На рисунке 1 представлена схема комплекса технических средств многоуровневой системы управления, обобщающая многочисленные применения таких систем для управления технологическими процессами нефтяной и газовой промышленности.

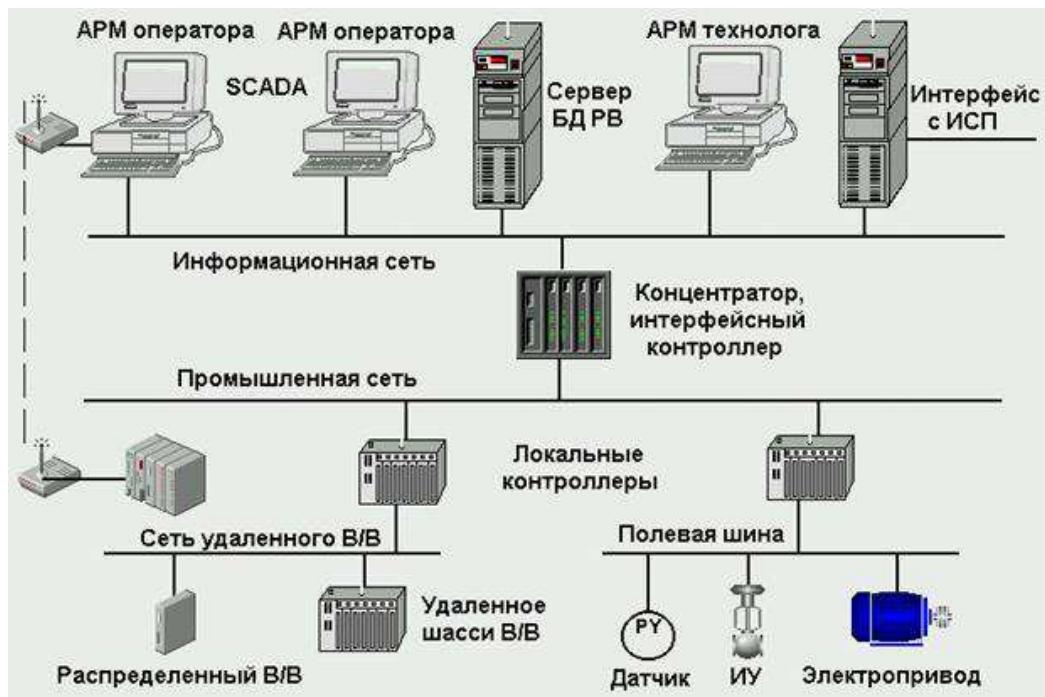


Рисунок 1 – Комплекс технических средств АСУ ТП

Как правило, это двух- или трехуровневые системы, и именно на этих уровнях реализуется непосредственное управление технологическими процессами. Специфика каждой конкретной системы управления определяется используемой на каждом уровне программно - аппаратной платформой.[27]

### **1.1 Задачи проектирования АСУ ТП на полевом уровне**

Основные функции АСУ ТП: сбор, передача, обработка и отображение информации, управление оборудованием, обеспечение безопасности технологического процесса и персонала. Функции АСУТП подразделяются на управляющие и информационные функции[4]. Результатами выполнения управляющих функций является выработка и реализация управляющих воздействий на управляемую систему. Содержанием информационных функций является сбор, обработка и представление информации о состоянии системы оперативному персоналу или передача этой информации для последующей обработки; вспомогательные функции обеспечивают решение

внутрисистемных задач. Указанные функции обеспечиваются техническими средствами АСУ ТП:

- устройства для обработки информации и управления технологическим оборудованием (промышленные компьютеры, программируемые логические контроллеры, программируемые реле);
- устройства для отображения информации о процессе и оперативного изменения его статуса оператором (панели оператора);
- устройства сбора и передачи информации.

Для АСУ ТП, как правило, существует некоторое интегрированное решение для автоматизации основных технологических процессов и их компонентов на уровне всего производства в целом или его отдельной структурной составляющей.

Следует отметить, что присутствие на промышленном предприятии АСУ ТП не исключает необходимости участия человека в отдельных производственных операциях. Участие человека может быть осуществлено для обеспечения необходимого уровня контроля над процессом, из-за сложности, невозможности или нецелесообразности автоматизации отдельных операций.

Межуровневое взаимодействие компонентов Системы должно осуществляться по каналам передачи данных, реализуемых с учетом особенностей передачи данных между соответствующими уровнями.[5]

На полевом уровне доминирующие протоколы для технологических инструментов: HART, FOUNDATION Fieldbus H1 и PROFIBUS PA. HART значительно отличается от двух других тем, что он является так называемым смарт-протокол, который представляет собой комбинацию цифровой связи одновременно накладывающийся на обычный сигнал 4-20 мА.

Таким образом, протокол HART является идеальным промежуточным решением при переходе от аналога. HART совместим с существующими аналоговыми регистраторами, контроллерами и индикаторами, в то же время, это делает возможным удаленное конфигурирование и диагностику с использованием цифровой связи. Протокол HART позволяет использовать

несколько устройств, подлежащие многократной передаче по одной паре проводов, но эта способность редко изучалась из-за низкой скорости обновления, обычно полсекунды на каждое устройство. Для подавляющего большинства установок устройства HART подключены к точке, то есть к одной паре проводов для каждого устройства и временно подключенного к нему персонального компьютера для настройки и обслуживания. Оба протокола Fieldbus H1 и PROFIBUS PA являются полностью цифровыми и используют идентичную кабельную систему, следуя стандарту IEC 61158-2. Однако помимо этого существуют значительные различия между этими двумя протоколами и в зависимости от желаемой архитектуры системы один может быть более подходящим, чем другой[6].

На полевом уровне устройства появляются в больших количествах, часто в сотнях или тысячах. Провод очень длинный, так как сетевой кабель должен проходить из диспетчерской полностью в полу, вверх здания, а затем разветвляться на устройства, разбросанные по всему предприятию. Поскольку существует ограничение на количество устройств, которые непосредственно могут быть подвергнуты многоточечной передаче в каждой сети, даже установка среднего размера может иметь много сетевых кабелей, работающих в поле, хотя существенно меньше, чем при использовании проводки «точка-точка». Поэтому сети на уровне поля были разработаны для обеспечения очень длинных проводов и обеспечения возможности использования полевых устройств в сети. Только одна пара проводов несет как мощность устройства, так и сигнал цифровой связи. Это устраняет необходимость в отдельном силовом кабеле, тем самым обеспечивая простую и недорогую проводку.

В качестве еще одной меры для снижения издержек инженеры выбрали умеренную скорость сети на местном уровне, поэтому вместо специального кабеля для передачи данных можно использовать обычный кабель для приборов. Также не требуются специальные соединители или концентраторы, что позволяет использовать прочные и защищенные от атмосферных воздействий соединения. Класс кабеля, используемый для обычных соединений

приборов на большинстве мест, более чем достаточен для сетей Fieldbus. В результате можно повторно использовать этот кабель, когда существующая установка переносится в полевую шину. В опасных производственных средах, где присутствуют огнеопасные жидкости, искробезопасность во многих случаях является предпочтительным методом защиты. Таким образом, сети на уровне поля были спроектированы таким образом, чтобы на шине устанавливались барьеры безопасности.

Поскольку инженеры выбрали умеренную скорость сетевого уровня, подключенные к нему устройства не требуют большой вычислительной мощности процессора для быстрой обработки связи. В результате они также потребляют очень мало энергии. Поскольку низкое энергопотребление приводит к падению низкого напряжения вдоль провода, поэтому возможно многоточечное подключение нескольких устройств в сети даже при длинных расстояниях между проводами и даже при использовании искробезопасных барьеров. Еще одним большим преимуществом сетей на уровне поля является то, что они обеспечивают большую свободу, когда дело доходит до топологии сети, поскольку провода могут работать довольно свободно.

Полевой уровень формирует начальную информацию для обеспечения функционирования используемой АСУ ТП. В полевой уровень формируется адресное перемещение информации о параметрах выполнения процесса, и выполняются управляющие воздействия, сформированные в АСУ ТП.

Используемое оборудование полевого уровня представляют первичные преобразователи (датчики), исполнительные органы и механизмы. Пример классификации основных терминов, применяемых для ключевого оборудования полевого уровня[7,8]:

Первичный измерительный преобразователь (первичный преобразователь): преобразовательный измерительный прибор, на который напрямую воздействует измеряемая физическая величина, иначе первичный

преобразователь в измерительной цепи измерительного прибора (установки, системы).

Датчик – конструктивно обособленный первичный преобразователь, транслирующий измерительные сигналы и предоставляющий информацию. В технологических процессах, датчик возможно вынести на приличное расстояние от средства измерений, принимающего его сигналы.

Для полноценного сбора информации о выполнении технологического процесса и генерации управляющих сигналов, в технологическое оборудование монтируется сеть встроенных датчиков[9].

Измерительный преобразователь – средство технического характера с неизменными метрологическими характеристиками, предназначенные для трансформации измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, оптимизированный для обработки, хранения, последующих преобразований и индикации или трансляции.

Измерительный преобразователь может входить в состав возможно применимого измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы), или непосредственно применяться совместно с каким-либо измерительным средством. По принципу генерации классифицируют аналоговые, цифровые и аналого-цифровые преобразователи.

По применению в измерительной цепи различают первичные и промежуточные преобразователи.

Физическая величина – одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Измеряемая физическая величина – физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи.

Измерительный сигнал – сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой физической величине.

Измерительная информация – информация о значении физических величин.

Исполнительное устройство – устройство системы автоматического (дистанционного) управления или регулирования, воздействующего на процесс в соответствии с получаемой командной сигнализацией.

Устройство, как правило, состоит из двух функциональных блоков: исполнительного механизма и исполнительного органа и может снабжаться дополнительными блоками.

Исполнительный механизм – механизм, являющийся функциональным блоком, предназначенным для управления исполнительным органом в соответствии с командной информацией.

Исполнительный орган – орган, воздействующий на технологический процесс путем изменения пропускной способности. Изменение пропускной способности производится в диапазоне от 100% до 0%.

Как видно из приведенных определений, технологическое оборудование представляет собой средство автоматизации полевого уровня непосредственно связанное с физическими параметрами технологического процесса и выбирается в соответствии с этими параметрами.

Автоматизация проектирования такого сложного объекта как АСУ ТП на современном этапе частично осуществлена на горизонтальных и вертикальных уровнях процесса проектирования. В основном решаются вопросы автоматизации этапа конструкторского проектирования. На этапе функционального проектирования зачастую нет ни коммерческих, ни отраслевых решений по автоматизации функционального проектирования АСУ ТП. Поэтому локальные решения задач автоматизации функционального проектирования АСУ ТП на разных уровнях являются актуальными.

Горизонтальные уровни характеризуются следующим:

– при переходе некоторого уровня, на котором рассматривается система S на соседний, более низкий уровень происходит разделение системы на блоки и рассмотрение вместо системы S ее отдельных блоков.

- рассмотрение каждого из блоков на уровне происходит с большей степенью детализации, чем на уровне.
- степень восприятия блоков на каждом уровне приблизительна одинакова и достаточна для принятия решения с помощью имеющихся на каждом уровне средств.
- использование на каждом уровне своих понятий системы и элемента.[10]

Таким образом, можно судить, что выбор полевого оборудования – есть некое представление выбора через параметрический и структурный синтез.

## **1.2 Синтез проектных решений при разработке АСУ ТП**

Принятие проектных решений охватывает широкий круг задач и процедур – от выбора вариантов в конечных и обозримых множествах до задач творческого характера, не имеющих формальных способов решения.

Соответственно применяются средства формального синтеза проектных решений, выполняемых в автоматическом режиме, так и вспомогательные средства, способствующие выполнению синтеза проектных решений в интерактивном режиме. К вспомогательным средствам относятся базы типовых проектных решений, системы обучения проектированию, программно-методические комплексы верификации проектных решений, унифицированные языки описания ТЗ и результатов проектирования.

Задачи синтеза структур проектируемых объектов относятся к наиболее трудно формализуемым. Существует ряд общих подходов к постановке этих задач, однако практическая реализация большинства из них неочевидна. Поэтому имеются лишь "островки" автоматического выполнения процедур синтеза среди "моря" проблем, ждущих автоматизации.

Именно по этой причине структурный синтез, как правило, выполняют в интерактивном режиме при решающей роли инженера-разработчика, а электронно-вычислительная машина (ЭВМ) играет вспомогательную роль:

предоставление необходимых справочных данных, фиксация и оценка промежуточных и окончательных результатов.

Однако в ряде приложений имеются и примеры успешной автоматизации структурного синтеза в ряде приложений; среди них заслуживают упоминания в первую очередь задачи конструкторского проектирования печатных плат и кристаллов БИС, логического синтеза комбинационных схем цифровой автоматики и вычислительной техники, синтеза технологических процессов и управляющих программ для механообработки в машиностроении и некоторые другие.

Структурный синтез заключается в преобразовании описаний проектируемого объекта: исходное описание содержит информацию о требованиях к свойствам объекта, об условиях его функционирования, ограничениях на элементный состав и т.п., а результирующее описание должно содержать сведения о структуре, т.е. о составе элементов и способах их соединения и взаимодействия.

Постановки и методы решения задач структурного синтеза в связи с трудностями формализации не достигли степени обобщения и детализации, свойственной математическому обеспечению процедур анализа. Достигнутая степень обобщения выражается в установлении типичной последовательности действий и используемых видов описаний при их преобразованиях. Исходное описание, как правило, представляет собой ТЗ на проектирование, по нему составляют описание на некотором формальном языке, являющемся входным языком используемых подсистем. Затем выполняют преобразования описаний, и получаемое итоговое для данного этапа описание документируют — представляют в виде твердой копии или файла в соответствующем формате для передачи на следующий этап.

Важное значение для развития подсистем синтеза имеют разработка и унификация языков представления описаний (спецификаций). Каждый язык, поддерживая выбранную методику принятия решений, формирует у пользователей — разработчиков технических объектов определенный стиль

мышления; особенности языков непосредственно влияют на особенности правил преобразования спецификаций. Примерами унифицированных языков описания проектных решений являются язык VHDL для радиоэлектроники, он сочетает в себе средства для функциональных, поведенческих и структурных описаний, или язык Express – универсальный язык спецификаций для представления и обмена информацией в компьютерных средах.

Имеется ряд подходов для обобщенного описания задач принятия проектных решений в процессе структурного синтеза.[11]

### 1.2.1 Задача принятия решений

Задачу принятия решений (ЗПР) формулируют следующим образом:

$$\text{ЗПР} = \langle A, K, \text{Мод}, \Pi \rangle, \quad (1)$$

где **A** — множество альтернатив проектного решения (морфологическое множество);

**K**= $(K_1, K_2 \dots K_m)$  – множество критериев (выходных параметров), по которым оценивается соответствие альтернативы поставленным целям;

**Мод:**  $A \rightarrow K$  – модель, позволяющая для каждой альтернативы рассчитать вектор критериев;

**Π** – решающее правило для выбора наиболее подходящей альтернативы в многоокритериальной ситуации. [11]

В свою очередь, каждой альтернативе конкретного приложения можно поставить в соответствие значения упорядоченного множества (набора) атрибутов **X**= $(x_1, x_2 \dots x_n)$ , характеризующих свойства альтернативы. При этом  $x_i$  – может быть величиной типа real, integer, Boolean, string (в последнем случае величину называют предметной или лингвистической). Множество **X** называют записью (в теории баз данных), фреймом (в искусственном интеллекте) или хромосомой (в генетических алгоритмах). Модель **Мод** называют структурно-

критериальной, если среди  $x_i$  имеются параметры, характеризующие структуру моделируемого объекта.

Основными проблемами в ЗПР являются:

- компактное представление множества вариантов (альтернатив);
- построение модели синтезируемого устройства, в том числе выбор степени абстрагирования для оценки значений критериев;
- формулировка предпочтений в многокритериальных ситуациях (т.е. преобразование векторного критерия  $K$  в скалярную целевую функцию);
- установление порядка (предпочтений) между альтернативами в отсутствие количественной оценки целевой функции (что обычно является следствием неколичественного характера всех или части критериев);
- выбор метода поиска оптимального варианта (сокращение перебора вариантов).

Присущая проектным задачам неопределенность и нечеткость исходных данных, а иногда и моделей, диктуют использование специальных методов количественной формулировки исходных неколичественных данных и отношений. Эти специальные методы либо относятся к области построения измерительных шкал, либо являются предметом теории нечетких множеств.

Измерительные шкалы могут быть:

- абсолютными;
- номинальными (классификационными), значения шкалы представляют классы эквивалентности, примером может служить шкала цветов; такие шкалы соответствуют величинам неколичественного характера;
- порядковыми, если между объектами  $A$  и  $B$  установлено одно из следующих отношений: простого порядка, гласящее, что если  $A$  лучше  $B$ , то  $B$  хуже  $A$ , и соблюдается транзитивность; или слабого порядка, т.е. либо  $A$  не хуже  $B$ , либо  $A$  не лучше  $B$ ; или частичного порядка. Для формирования целевой функции  $F(x)$  производится оцифровка порядковой шкалы, т.е. при минимизации, если  $A$  предпочтительнее  $B$ , то  $F(X_a) < F(X_b)$ , где  $X_a$  и  $X_b$  — множества атрибутов объектов  $A$  и  $B$  соответственно;

– интервальными, отражающими количественные отношения интервалов: шкала единственна с точностью до линейных преобразований, т.е.  $y = ax+b$ ,  $a>0$ ,  $-\infty < b < \infty$ , или  $y = ax$  при  $a\neq 0$ , или  $y = x+b$ .

В большинстве случаев структурного синтеза математическая модель в виде алгоритма, позволяющего по заданному множеству  $\mathbf{X}$  и заданной структуре объекта рассчитать вектор критериев  $\mathbf{K}$ , оказывается известной. Например, такие модели получаются автоматически в программах анализа типа Spice, Adams или ПА-9 для объектов, исследуемых на макроуровне. Однако в ряде других случаев такие модели неизвестны в силу недостаточной изученности процессов и их взаимосвязей в исследуемой среде, но известна совокупность результатов наблюдений или экспериментальных исследований. Тогда для получения моделей используют специальные методы идентификации и аппроксимации (модели, полученные подобным путем иногда называют феноменологическими).

Среди методов формирования модели по экспериментальным данным наиболее известны методы планирования экспериментов. Не менее популярным становится подход, основанный на использовании искусственных нейронных сетей.

Если же математическая модель  $\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{K}$  остается неизвестной, то стараются использовать подход на базе систем искусственного интеллекта (экспертных систем).

Возможности практического решения задач дискретного математического программирования (ДМП) изучаются в теории сложности задач выбора, где показано, что задачи даже умеренного размера, относящиеся к классу NP-полных задач, в общем случае удается решать только приближенно.

Поэтому большинство практических задач структурного синтеза решают с помощью приближенных (эвристических) методов. Это методы, использующие специфические особенности того или иного класса задач и не гарантирующие получения оптимального решения. Часто они приводят к

результатам, близким к оптимальным, при приемлемых затратах вычислительных ресурсов.

Одним из подходов к решению задач принятия проектных решений является использование методов искусственного интеллекта и баз знаний.

Если все управляемые параметры альтернатив, обозначаемые в виде множества  $X$ , являются количественными оценками, то используют приближенные методы оптимизации. Если в  $X$  входят также параметры неколичественного характера и пространство  $X$  неметризуемо, то перспективными являются эволюционные методы вычислений, среди которых наиболее развиты генетические методы. Наконец, в отсутствие обоснованных моделей Мод их создают, основываясь на экспертных знаниях в виде некоторой системы искусственного интеллекта.

Примерами применения генетических методов для решения задач, относящихся к проблематике ИПИ-технологий и САПР, могут служить синтез расписаний и распределение ресурсов в интегрированных логистических системах, оптимизация распределения нагрузки в корпоративных информационных сетях, распределение приложений по подсхемам виртуальной локальной вычислительной сети и некоторые другие.

### **1.2.2 Представление множества альтернатив**

Простейший способ задания множества  $A$  — явное перечисление всех альтернатив. Семантика и форма описания альтернатив существенно зависят от приложения. Для представления таких описаний в памяти ЭВМ и доступа к ним используют информационно-поисковые системы (ИПС). Каждой альтернативе в ИПС соответствует поисковый образ, состоящий из значений атрибутов  $x_i$  и ключевых слов вербальных характеристик.

Явное перечисление альтернатив при представлении множества альтернатив возможно лишь при малой мощности  $A$ . Поэтому в большинстве случаев используют неявное описание  $A$  в виде способа (алгоритма или набора

правил **P**) синтеза проектных решений из ограниченного набора элементов **Э**. Поэтому здесь **A=<P,Э>**, а типичный процесс синтеза проектных решений состоит из следующих этапов:

- формирование альтернативы **A<sub>i</sub>** (это может быть выбор из базы данных ИПС по сформированному поисковому предписанию или генерация из **Э** в соответствии с правилами **P**);
- оценка альтернативы по результатам моделирования с помощью модели **Мод**;
- принятие решения относительно перехода к следующей альтернативе или прекращения поиска (выполняется лицом, принимающим решение или автоматически).

Для описания множеств **P** и **Э** применяют:

- морфологические таблицы и альтернативные И-ИЛИ-деревья;
- представление знаний в интеллектуальных системах — фреймы, семантические сети, продукции;
- генетические методы;
- базы физических эффектов и эвристических приемов, применяемые при решении задач изобретательского характера.

### **1.2.3 Морфологические таблицы**

Морфологические таблицы, предполагают результаты морфологического анализа и применяются с целью решения проблем структурного синтеза.

Морфологическая таблица (**M**) предполагает из себя общую структуру в виде большого количества функций, исполняемых компонентами синтезируемых объектов рассматриваемого класса, и подмножества методов их реализации. Любой функции возможно установить в соотношение 1 строку таблицы, любому методу её реализации — 1 клетку в данной строке.

Следовательно, в морфологических таблицах элемент  $M_{ij}$  означает  $j$ -й вариант реализации  $i$ -й функции в классе технических объектов, описываемом матрицей  $M$ .[12]

Получается что, множество альтернатив можно представить в виде отношения  $M$ , так называемого морфологической таблицей  $M = \langle X, R \rangle$ , где  $X$  — множество свойств, присущих объектам рассматриваемого типа,  $n$  — число этих свойств,  $R = \langle R_1, R_2 \dots R_n \rangle$ ,  $R_i$  — множество значений (способов реализации)  $i$ -го свойства, мощность этого множества далее обозначена  $N_i$ . При этом собственно множество альтернатив  $A$  представлено композицией множеств  $R_i$ , т.е. каждая альтернатива включает по одному элементу (значению) из каждой строки морфологической таблицы. Очевидно, что общее число альтернатив  $k$ , представляемых морфологической таблицей, равно:

$$k = \prod_{i=1}^n N_i, \quad (2)$$

Морфологические таблицы как правило считают средством неавтоматизированного синтеза, помогающим смотреть сжато представленные варианты, преодолевать эмоциональную инерцию. Последнее связано с тем, что интерес принимающего решения направляется на варианты, которые напрямую без морфологической таблицы сохранились бы за пределами его поля зрения.

Собственно таблица  $M$  никак не включает данных о методе синтеза. Но в основе  $M$  допустимо создание методов морфологического синтеза с элементами алгоритмизации. В подобных методах вводится нормирование морфологического пространства. Морфологическое пространство составляют возможные законченные структуры, принимается, что расстояние между структурами  $C_1$  и  $C_2$  есть число несовпадающих элементов (каждая клетка  $M$  есть один элемент). Поэтому можно говорить об окрестностях решений. Далее исходят из предположения о компактности "хороших" решений, которое позволяет вместо полного перебора ограничиваться перебором в малой окрестности текущей точки поиска. Таким образом, гипотеза о "компактности"

и метризация пространства решений фактически приводят к построению математической модели, к которой можно применить методы дискретной оптимизации, например локальные методы.

К недостаткам **M** относятся неучет запрещенных сочетаний элементов в законченных структурах и отражение состава элементов в структурах без конкретизации их связей. Кроме того, морфологические таблицы строят в предположении, что множества  $R_i$  взаимно независимы, т.е. состав способов реализации  $i$ -й функции не меняется при изменении значений других функций. Очевидно, что предположение о взаимной независимости множеств  $R_i$  оправдано лишь в сравнительно простых структурах. Последний недостаток устраняется путем обобщения метода морфологических таблиц — при использовании метода альтернативных (И/ИЛИ) графов.

#### 1.2.4 Альтернативные графы

Морфологическую таблицу возможно показать в виде дерева. На рисунке 2 функции изображены вершинами И (темные кружки), значения функций — вершинами ИЛИ (светлые кружки). Несомненно, что таблица предполагает большое число однотипных объектов, так как все без исключения характеризуются одним и тем же большим количеством функций.

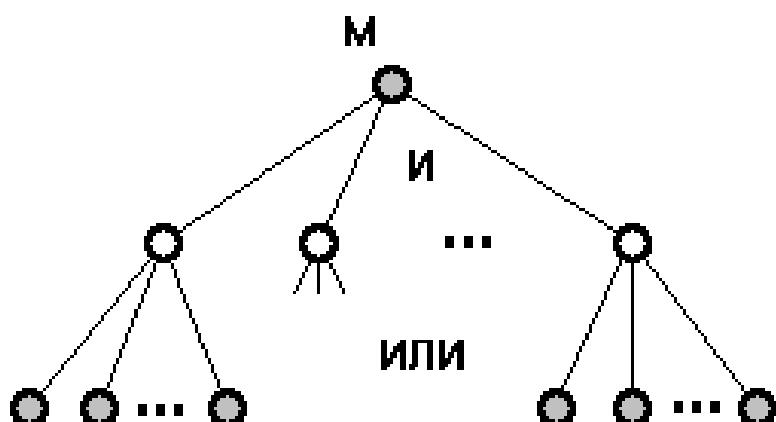


Рис.2 – Дерево соответствующее морфологической таблице

Деревья с вершинами И и ИЛИ называют И-ИЛИ-деревьями. В общем случае разные функции могут быть реализованы одними и теми же способами, тогда вместо дерева имеем граф, называемый И-ИЛИ-графом (или альтернативным графом).[13]

Для разнотипных объектов применяют многоярусные альтернативные графы. Например, на рисунке 3 показан двухярусный граф, в котором для разных типов объектов предусмотрены разные подмножества функций.

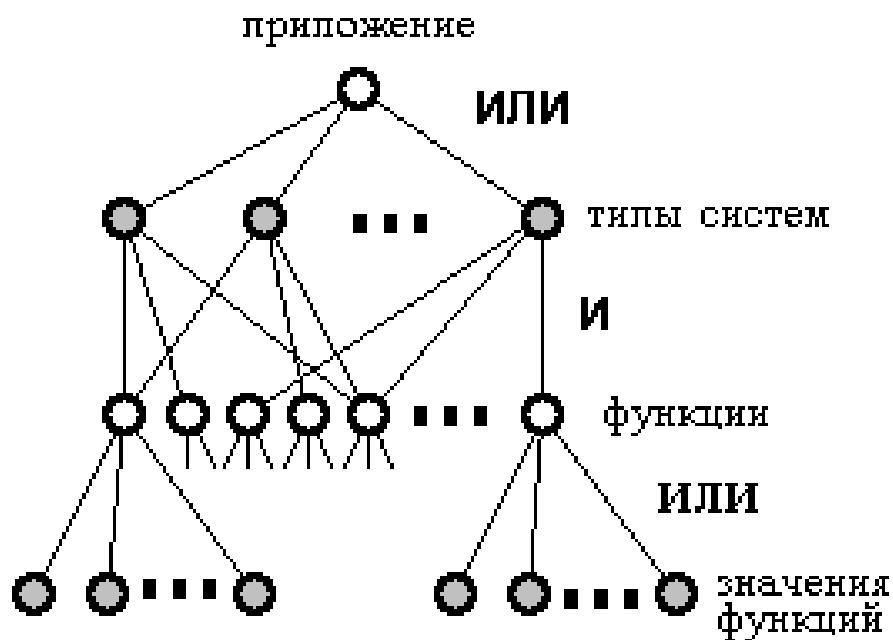


Рисунок 3 – И-ИЛИ-граф

Если допустить некоторую избыточность при изображении И-ИЛИ-графа, то его можно превратить в И-ИЛИ-дерево, что ведет к определенным удобствам.

Очевидно, что И-ИЛИ-дерево можно представить как совокупность морфологических таблиц. Каждая И вершина дерева соответствует частной морфологической таблице, т.е. множеству функций так, что **I**-я выходящая ветвь отображает **i**-ю функцию. Каждая ИЛИ вершина, инцидентная **i**-й ветви, соответствует множеству вариантов реализации **i**-й функции, при этом **j**-я исходящая из ИЛИ вершины ветвь отображает **j**-й вариант реализации.

Алгоритмизация структурного синтеза на базе И-ИЛИ-деревьев требует введения правил выбора альтернатив в каждой вершине ИЛИ. Эти правила чаще всего имеют эвристический характер, связаны с требованиями ТЗ, могут отражать запреты на сочетания определенных компонентов структур.

Трудности эффективного решения задачи существенно возрастают при наличии ограничений, типичными среди которых являются ограничения на совместимость способов реализации разных функций, т.е. ограничения вида

$$C_{ij} \wedge C_{pq} = \text{false}, \quad (3)$$

где  $C_{ij} = \text{true}$ , если в оцениваемый вариант вошел элемент  $\mathcal{E}_{ij}$ , иначе  $C_{ij} = \text{false}$ .

Условие (3) означает, что в допустимую структуру не могут входить одновременно элементы  $\mathcal{E}_{ij}$  и  $\mathcal{E}_{pq}$ . Совокупность ограничений типа (3) можно представить как систему логических уравнений с неизвестными  $C_{ij}$ . Тогда задачу синтеза можно решать эволюционными методами, если предварительно или одновременно с ней решать систему логических уравнений (задачу о выполнимости).

### 1.2.5 Методы распространения ограничений

Цель распространения ограничений заключается в присваивании любой управляемой переменной определенного смысла подобным способом, для того чтобы в то же время удовлетворялись все без исключения ограничения.

В многочисленных задачах структурного синтеза большое число  $D$  возможных альтернатив, задаваемое ограничениями  $W(X) > 0$  и (либо)  $Z(X) > 0$ , содержит относительно небольшое количество компонентов, и в качестве результатов синтеза берется каждый из данных альтернатив. Подобное решение проблемы зачастую осуществляют с помощью метода распространения ограничений (Constraints Propagation).

Сущность данного метода состоит в сужении возможных промежутков контролируемых переменных  $\mathbf{X}$  с помощью учета начальных ограничений в выходные характеристики  $\mathbf{W}$  и  $\mathbf{Z}$ .[14]

Для объяснения способа проанализируем легкий пример. В задаче 3 управляемых переменных  $x, y, z$ , установлены начальные интервалы возможных значений данных переменных  $x$

$$x + y \geq 5z, \quad (4)$$

$$x \geq y + 5, \quad (5)$$

Распространение ограничения (4) на интервал переменной  $z$  приводит к уменьшению его верхней границы, так как

$$z \leq \frac{x_{max} + y_{max}}{5} = 40, \quad (6)$$

а с учетом ограничения (5) к ее новой корректировке  $z \leq 39$ , так как  $y_{max}=95$ , а также к увеличению нижних границ переменных  $x$  и  $y$ , так как решение неравенств  $x + y \geq 50$  и (5) дает  $x \geq 28, y \geq 22$ . Таким образом, получено сужение допустимой области  $x \in [28:100], y \in [22:100], z \in [10:100]$ .

Способ можно свободно применить на задачах с нечисловыми параметрами. В данном случае взамен сокращения числовых интервалов делают сокращение мощности возможных значений параметров.

Одним из фактических приложений метода считается отбор возможных альтернатив в большом количестве синтезируемых структур при ограничениях на сочетаемость компонентов структуры.Пример 1

Фрагмент структуры, состоящий из трех компонентов  $A, B$  и  $C$ , причем  $A \in \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}, B \in \{b_1, b_2, b_3, b_4\}, C \in \{c_1, c_2, c_3\}$ . Списки допустимых сочетаний компонентов в синтезируемой структуре:

- **L1:**  $a_1, b_1; a_2, b_1; a_4, b_2; a_5, b_3; a_5, b_4;$
- **L2:**  $b_1, c_1; b_3, c_3; b_4, c_1; b_4, c_2;$

- **L3**:  $a_2, c_3; a_3, c_2; a_4, c_3; a_5, c_2$ .

Сокращение 1-го списка выполняется путем поочередного выбора в нем  $a_i$ , фиксации в **L3** соответствующих значений  $c_k$ , после в **L2** сопряженных с  $c_k$  значений  $b_j$ . Если в **L1** есть элемент  $a_i, b_j$ , тогда он сохраняется в сокращенном списке, а остальные сочетания с  $a_i$  из **L1** удаляются. В примере, поскольку значения **a1** в **L3** нет, значит сочетание **a1, b1**, недопустимо и из **L1** удаляется. Далее для символа **a2** фиксируется в **L3** значение **c3**, ему в **L2** соответствует только значение **b3**. Поэтому **a2,b1** — также недопустимое сочетание. Обработав подобным образом все списки, получается результат распространения ограничений в виде **L1:a5,b4; L2:b4,c2; L3:a5,c2**.

Следовательно, решение состоит из единственной допустимой структуры, включающей компоненты  $a_5, b_4, c_2$ .

Ограничение списков производится в повторном процессе вплоть до совпадения их содержимого в 2-ух минувших итерациях.

На основе метода распространения ограничения фирмой ILOG был основан микропрограммный комплекс оптимизации и синтеза проектных решений, состоящий из подсистем Solver, Configurator, Scheduler и др.

Основной результат - ILOG Solver. ILOG Solver поддерживает работу с целыми, вещественными, логическими и многократными переменными и дает возможность применять линейные, нелинейные и закономерные ограничения. В ILOG Solver осуществлен ряд эффективных алгоритмов поиска, содержащих как обычные стратегии (поиск в глубину, отбор сначала оптимального), таким образом и специальные алгоритмы для задач удовлетворения ограничения над конечными областями.

## 1.2.6 Выбор готовых прототипов

Метод подразумевает библиотеку готовых структур. Важный недостаток - потребность прямолинейного поиска абсолютно всех структур. В случае если нет возможности отыскать целиком оптимальную структуру, необходимо

выбрать ближайшую и изменить её с целью соотношения указанным условиям посредством удаления либо добавления новейших компонентов, внедрения добавочных либо устранения лишних ссылок.

### **1.2.7 Построение частной структуры из общего**

В данном случае сперва формируется состав с наибольшей избыточностью, что считается обобщением абсолютно всех популярных структур объекта этого вида. Требуемая структура синтезируется посредством вытаскивания излишних компонентов и взаимосвязей общей структуры. Данный способ обычно применяется в синтезе вычисляемых процессов, если обобщенный ход считается чередой абсолютно всех вычисляемых операций, применяемых с целью формирования объекта этого класса, и сочетание состоит в подборе из данной цепочки только лишь этих процедур, какие напрямую нужны в любой определенный вариант. Так как подбор выполнен лично разработчиком в базе его навыка, данный способ, равно как и предшествующий, принадлежит к методам экспериментального синтеза.[15]

Частный случай направленного поиска по дереву AND – OR

Данный способ возможно анализировать равно как индивидуальный случай построения определенной структуры из общей. В качестве единой структуры есть заранее сформированное AND -OR «дерево», в коем любая категория путей из корневой вершины посредством вершины AND, к крайним вершинам отвечает одной определенной структуре, рисунок 4. Сочетание в дереве AND -OR практически использовать в этих случаях, если объект свободно разлагается на его составные части, какие распадаются на ещё наиболее мелкие, любое разделение порождает вершину типа I, а любой ярус разложения - это уровень дерева. Из вершин I другие реализации любой части объекта производят OR-вершину. Ветки «древа», выходящие из вершин OR, считаются именами приемов реализации данных элементов либо их свойств, которые напрямую представляют конкретную значимость в синтезе. В качестве примера

на рисунке 4 представлено «дерево» AND - OR для некоторого теоретического объекта, какой разбивается на части a, b, а далее любой из них в соответствии с этим на части c, d и e, f, g, h.

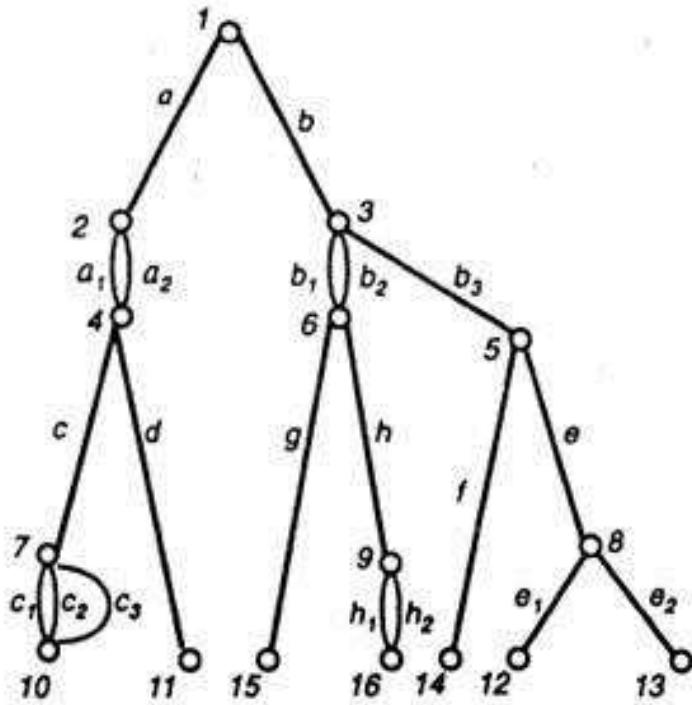


Рисунок 4 - Структура дерева ИЛИ

Части a, c, h могут быть реализованы в соответствии с методами a1, a2, c1, c2, h1, h2. В данном случае метод распада части a на c и d никак не зависит от метода реализации части a (a1 либо a2), а метод распада части b - зависит (для b1, в таком случае b разделяется на e и f, а если b2 или b3 осуществлено - посредством g и h). Несомненно, то что в случае если «дерево» заключается только лишь из вершин I, то оно описывает 1 структуру объекта. Другой подбор структуры формируется вершинами OR. Обход «дерева» с вершин OR вероятен либо по глубине, или согласно ширины. С любой другой реализацией (A1 либо a2; c1, c2 либо c3 и т. д.) объединяет оператор перехода, который допускает переход к последующей вершине AND только лишь в этом случае, если в вершине OR выполняются конкретные ограничения. Ограничения могут быть глобальными, со ссылкой на весь объект и локальные, сопряженные с этой реализуемой частью объекта.

Направленный отбор согласно «бревну» состояний и качеств. Структурно-параметрический синтез может быть выполнен не только в основе дерева AND-OR, но и с помощью «дерева» состояний и качеств, рисунок 5.

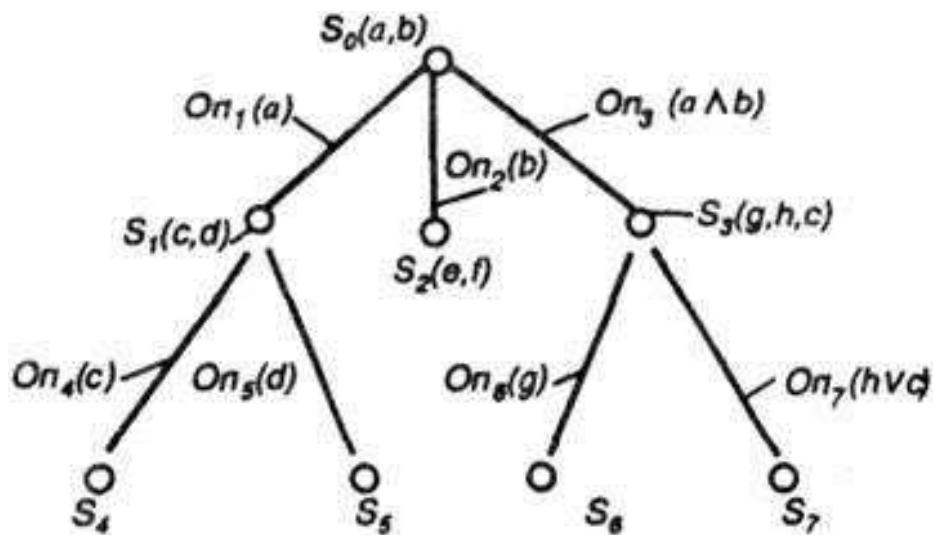


Рисунок 5 - Древо состояний и свойств

Каждая вершина  $S_i(a_1, \dots, a_n)$  в этом «древе» рассматривается как проблема, возможное решение которой имеет свойства  $a_1, \dots, a_n$ , и каждый оператор перехода  $On_t(a)$  имеет смысл: «Если решение задачи  $S_{i-1}$  должно иметь свойство  $a$ , то переходим к решению задачи  $S_i$ ». Таким образом, для решения задачи  $S_0$  обладало свойством  $A \wedge B$ . Следует решить задачу  $S_3$ , а для того чтобы решить задачу  $S_3$  принимало нужные свойства  $h \vee c$ , следует решить задачу  $S_7$ . Корневое состояние  $S_0$  имеет смысл исходной задачи, промежуточных состояний  $S_1$  и  $S_3$ , смысл промежуточных задач, в которые разделена проблема начального синтеза,  $S_2 S_4 S_5 S_6 S_7$  - значение базовых, терминальных, неделимых подзадач. Рассмотрим процедуру синтеза, пусть известно, что решение должно одновременно удовлетворять свойствам  $(a, b, h, c)$ . Необходимо найти конечную вершину, имеющую указанные свойства.

Решение состоит в том, чтобы найти путь от  $S_0$  для той конечной вершины, которая имеет указанные свойства  $a, b, h \vee c$ . В данном случае имеется

$S_{4(hv\ c)}$ ,  $S_{5(hv\ c)}$ ,  $S_{2(b)}$ ,  $S_{6(a\Lambda b\Lambda d)}$ ,  $S_{7(a\Lambda b\Lambda(hvc))}$ , вычисление должно привести в  $S_7$ . Данний пример наглядно показывает некоторые характерные особенности обработки знаний в искусственном интеллекте с использованием «древа» состояний.

Наследование свойств. Рисунок 5 наглядно показывает, что состояние  $S_{7(c,d)}$  в действительности по мимо свойств  $c,d$  должно обладать и свойством предыдущей вершины  $S_0$  состояние  $S_{2(e,f)}$  – свойствам  $b$ , а состояние  $S_{3(d,h,c)}$  – свойством  $a\Lambda b$ . Отсюда следует, что более точным было бы обозначение состояний в виде  $S_{1(c,d,a)}$ ,  $S_{2(e, f, b)}$ ,  $S_{3(d, h, c, a\wedge b)}$ . Непосредственно возможно уточнить записи операторов  $On_4(c)$  в виде  $On_4(c\Lambda a)$ ;  $On_5(d)$  в виде  $On_5(d\Lambda a)$ . При условии последовательного прохождения вершин при поиске «дерева» передача свойств родительской вершины детям называется «свойством наследования» в искусственном интеллекте. Механизм автоматического наследования свойств позволяет упростить запись и реализацию операторов перехода без учета свойств предыдущих состояний. Он «по умолчанию» обеспечивает наличие в последующих состояниях свойств предыдущих. Если обратить внимание на то что «наследование свойств» в «древе поиска» не является необходимым, и его можно отменить, тогда можно сделать выводы, что состояние «отцовское» и «дочернее» не связано со свойствами другого человека, например, они ссылаются к понятиям с другой семантикой  $S_0$  – оператор,  $S_1$  – пульт.

Если состояния в «древе» относятся к одному и тому же классу, то механизм наследования свойств позволяет вам «увеличить» свойства состояний в процессе последовательного разворачивания вершин «древа». Это особенно важно при решении задач классификации и диагностики.

Наследование условий перехода. Аналогично принципу с наследованием свойств состояния можно говорить о наследовании условий перехода в операторах перехода  $On$ . Это позволяет нам объяснить результат поиска.

## 1.2.8 Метод сканирования (слепой поиск)

Суть метода состоит в поочередном переборе абсолютно всех возможных значений независимых неустойчивых, привязанных к возможной области. Точки, пребывающие за границами области допуска, исключаются с перечня значений, рисунок 6.

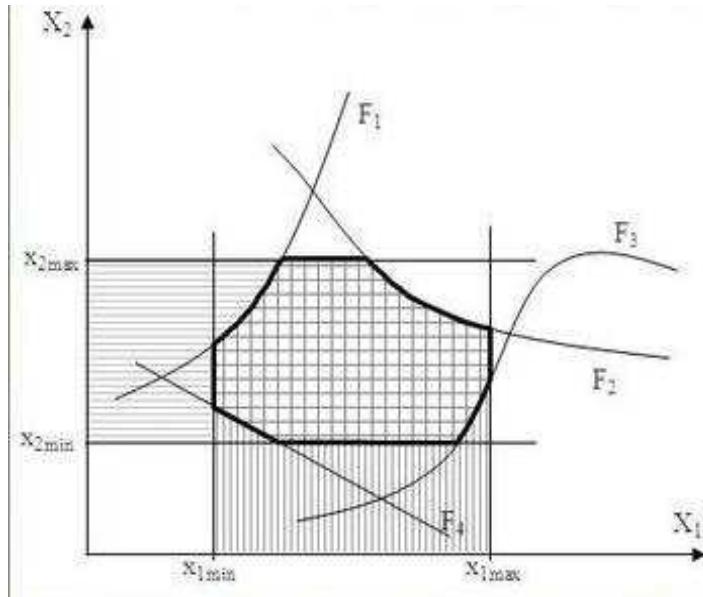


Рисунок 6 - Метод сканирования

Этот метод используется для небольшого числа переменных.

Проверка производится с целью нахождения любого узла сетки на принадлежность области функциональности  $x_p$ , а в случае области  $x_p$  рассчитывается и сохраняется роль функции критериев качества и данного узла. При последующем анализе запоминается только лишь узел с значением min-м или max-м функции.

Достоинства: наиболее совершенные сведения о оптимизированной функции; вероятность определения глобального экстремума; При присутствии ограничений условный экстремум.

Недостатки: существенное число измерений и продолжительное период расчетов. Способ используется с незначительным количеством самостоятельных переменных.

### **1.2.9 Морфологический ящик**

Наиболее известный из перечня морфологических методов, который был представлен астрологом Фрицем Цвикки. Данный способ более подойдет для решения технических и финансовых трудностей, какие напрямую завоевали его известность.

Алгоритм решения проблемы состоит из:

- 1) четко выразить проблему;
- 2) установить и дать характеристику всем параметрам вероятных решений (выяснить классификационные свойства и их смысл);
- 3) выстроить морфологический ящик, который включает все решения задачи, формализовать его в варианте морфологической таблицы либо каковым-или иным методом;
- 4) изучить решения, находящиеся в морфологическом поле с точки зрения интересующих целей;
- 5) подобрать и ввести наилучшее разрешение (наилучшие постановления).[16]

Нельзя путать метод морфологического ящика и морфологических таблиц. Метод морфологического ящика считается методом, а морфологическая таблица предполагает способ отражения морфологического блока. В добавок к морфологической таблице морфологическая коробка может быть показана в варианте морфологического дерева AND / OR, морфологического графа либо с применением специализированных языков и вычислений, таблица 1.

Таблица 1- Пример логики морфологического ящика

	Параметры	Варианты					
A	Протоколы	1. Profibus	2. IO-link (точка-точка)	3. PROFINet	4. HART	5. DeviceNet	6. Пром. Ethernet
Б	Способ передачи	1. RS485	2. RS-232	3. Wi-Fi (802.11b/g)	4. M-Bus	5. RS-232	
В	Скорость передачи(kBit/s)	1. 9,6-187,5	2. 500	3. 1500	4. 1200		
Г	Длина сегмента (m)	1000	400	200	100		
Д	Службы передачи	1. DP	2. PA	3. FMS	4. FDT	5. TCP / IP	6. IRT
Е	Подключение шины	1. OLM	2. OLP	3. LWL	4. AS		

Преимущества: Удобен для инженеров и экономистов, прост в применении.

Недостаток: обилие вариантов, из которых трудно выбрать наилучший.

### 1.2.10 Задача блочного рюкзака

Классическая проблема рюкзака (о загрузке) известна очень давно, ниже ее формализация. Пусть есть  $N$  разных объектов, каждый объект имеет вес  $w_i$  и полезность  $r_i$ , а также максимальный вес  $W$ , который можно положить в рюкзак. Требуется собрать такой набор объектов  $P$ , чтобы их полезность была наибольшей, а общий вес не превышал  $W$ . Конечно, никто не собирается писать программу, чтобы лучше всего загрузить рюкзак, отправиться в поход или поездку, все слишком просто, и никто не думает об этом, но есть более широкое приложение.

Проблема загрузки (проблема рюкзака) и ее модификации широко используются на практике в прикладной математике, криптографии, экономике,

логистике, чтобы найти решение для оптимальной загрузки различных транспортных средств: самолетов, кораблей, железнодорожных вагонов.

Алгоритм задачи блочного рюкзака - это алгоритм для решения за разумное время, и это проблема. Или берется более быстрый алгоритм, однако он не всегда решает проблему, либо выбирается более точный, который снова не работает. Существует несколько видов проблемы, рисунок 7:

- Каждый предмет может быть использован только один раз;
- Каждый предмет может быть принят столько раз, сколько требуется;
- Существует несколько ограничений размера рюкзака;
- Некоторые вещи имеют более высокий приоритет, чем другие.

Вместимость ранца = 5	i	1	2	3
номер	W	1	3	2
веса предметов	P	6	12	10
<b>1я итерация (Weight = 1)</b>				
i=1	Value	Weig ht	1	
заносим p[1] в value[1, 1] для веса 1 и набора	1		6	
предметов 0..1 это оптимум	2			
предмет 2 не помещается в вес=1 значит value[1, 2]=value[1, 1]				
то же самое для value[1, 3]				
Следовательно оптимум для Value[1, 3]=6, то есть для				
данного набора предметов и веса рюкзака=1.				

Рисунок 7 - Пример построения решения - задача блочного рюкзака

Преимущества: применение динамического программирования, полного поиска, отраслевого и граничного методов.

Недостатки: «жадные алгоритмы».

### **1.3 Развитие методов структурного синтеза**

На данном этапе разработки инструментов моделирования и проектирования автоматизации задача структурного синтеза, как правило, решается вручную, в интерактивном режиме компилируется модель технического объекта, согласно которой впоследствии выполняются вычисления[17].

В настоящее время такие аналитические исследования, основанные на накопленном знании некоторых типов дифференциальных уравнений и точных представлений их решений, получили широкое распространение.

Каждое точное решение имеет большую информационную ценность, во-первых, как точное описание реального сложного процесса в рамках этой аналитической модели; Во-вторых, как стандарт или результат первого приближения для реализации различных численных методов; В-третьих, в качестве фундаментального теоретического факта, помогающего улучшить используемую модель.

В свою очередь, определение структуры системы базовых генераторов и определяющих соотношений дает полное представление для математической модели. Полиномиальное представление, выбранное, как правило, удобно из-за конечной размерности базиса инвариантной системы и компактности полиномиальной топологии, а также долгое время использовалось в формальных теориях математического моделирования.

Свойства инвариантности, симметрия модельных уравнений являются фундаментальными свойствами любого сложного процесса и, соответственно, математической модели, описывающей этот процесс. Инвариантные методы эффективны практически для всех типов математических моделей - от алгебраических до динамических.

Знание группы симметрии - группы допустимых преобразований переменных или параметров - также дает важную информацию об исследуемой модели, а именно: средство классификации набора решений; Средство

классификации семейств дифференциальных уравнений, зависящих от произвольных параметров или функций; Возможность определения типов дифференциальных уравнений, допускающих заданную группу симметрии.

При решении задач структурного синтеза дифференциальными уравнениями с априорной симметрией и проблемой анализа структуры симметрии уравнений, обычно рассматривается не только одно уравнение, инвариантное некоторой группе симметрий, но и класс уравнений, связанных с дискретной симметрией, а также дифференциальный комплекс уравнений разных порядков, основанный на одном многообразии.

Реализация в компьютерном формате этой теоретико-групповой методологии, для получения аналитических решений для широкого класса систем нелинейных дифференциальных уравнений, радикально облегчает моделирование и построение соответствующих элементов управления.

Современные компьютерные технологии предоставляют исследователям не только разнообразные аналитические вычислительные системы, но и инструменты для обработки сложной математической информации, а также предоставляют новые возможности организовать, сохранить, проиллюстрировать сеть, доступную для многих пользователей через интернет, для передачи такой информации. Таким образом, появление и развитие моделей компьютерного банкинга, основанных на справочной литературе, также приводит к созданию базы знаний и интеллектуальных эталонных систем.

Одна из основных проблем общей теории дифференциальных уравнений состоит в изучении структуры решений любого заданного дифференциала уравнения непосредственно его аналитической формой, независимо от возможности интегрирования этого уравнения в конечной форме. Исследуется связь аналитической структуры уравнений с их решениями. При этом используются методы аналитической теории дифференциальных уравнений, которые позволяют ответить на следующие вопросы: какая структура должна иметь дифференциальное уравнение, чтобы она имела решение, которое удовлетворяет заданным дополнительным свойствам или обладает данной

структурой; Как построить это дифференциальное уравнение. Установлено, в некотором смысле, адекватность структуры уравнений и их решений[18].

Динамические минимальные модели, описываются дифференциальными уравнениями:

$$F(x, y, y', \dots, y(n), a) = 0, \quad (7)$$

решения будут рассматриваться, как правило, в параметрической форме:

$$(x = \varphi(\tau C_1, \dots, C_n)) \mid (y = \Psi(\tau C_1, \dots, C_n)), \quad (8)$$

уравнения интегральных многообразий соответствуют виду:

$$f_i(\tau u_j C_{j,l}) = 0, \quad (i = 1, n; j = 1, n; l = 1, m; m \leq n) \quad (9)$$

где  $u_j(\tau)$  — фазовые переменные;

$C_{j,l}(\tau)$  — в большинстве случаев неопределенные неизвестные, причем  $DC_j = 0$ .

Допустим  $P[\tau, \varphi(\tau), \psi(\tau)]$  — дифференциальное поле алгебраических функций, порожденное двумя функционально-независимыми полиномами  $\varphi(\tau)$  и  $\psi(\tau)$ .

Образуем множество полиномов вида:

$$\varphi^i = C_{tr1} \varphi_{tr2} \psi_{tr3}, \psi^i = C_{sr1} \varphi_{sr2} \psi_{sr3} \quad (10)$$

Задача структурного синтеза сводится к построению (7) с априорными свойствами по заданной паре функций  $(\varphi(\tau), \psi(\tau))$  определенной структуры, а задача инвариантного анализа ставится как задача восстановления многообразия (9) по системе (7) в заданном классе функций с симметричными свойствами.

Если написать соответствующее общее уравнение многообразия формальным образом (через формальные коэффициенты, которые требуются для определения, для простоты выбирается полином второго порядка, где  $u_j$  и  $z_l$  выражаются через  $\phi$  и  $\psi$ ):

$$a1\tau^2 + a2 \phi^2 + a3\psi^2 + a4\tau \phi + a5\tau\psi + a6 \phi\psi + a7C1\tau + a8C1\phi + a9C1\psi + a10C2\tau + a11C2\phi + a12C2\psi \quad (11)$$

Тогда, дифференциал (11) и подставляя соответствующие значения для производных, получим определяющее уравнение, расщепление по степеням  $\tau$  и произвольные постоянные  $C_{1,2}$  приводит к определяющей системе, откуда мы получаем искомое интегральное многообразие.

Формирование таких динамических моделей в значительной степени зависит от структурно-инвариантного анализа и синтеза, поскольку знание симметрии уравнений (7), приводит к применению групповых операторов и ко всему многообразию методов современной теории групп Ли-Беклунда. Полученные генераторы групп преобразований (особенно дискретные) также генерируют семейства соизмеримых аналогичных динамических моделей. Структурное сходство, в свою очередь, позволяет отличить класс моделей в виде некоторого D-комплекса.

Для заданных интегральных многообразий, оператора полного дифференцирования и дискретной симметрии (группового генератора) мы определяем D -комплекс в виде диаграммы, рисунок 8.

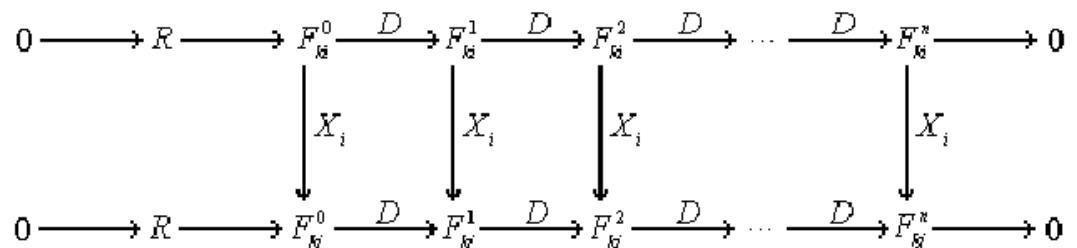


Рисунок 8 -D-комплекс в виде диаграммы

В общем случае введенный комплекс определяет для  $\forall q \geq 1$  - параметрическое семейство решений для 1 -класса дифференциальных уравнений  $F_{kq-1}$ , общие решения класса уравнений  $F_{kq}$  частные решения для их дифференциальных продолжений ( $n > q$ ).

Алгоритмичность основных методов велика. Преимущество по сравнению с ранее разработанными эвристическими методами. Существует явный алгоритм построения определяющих уравнений для нахождения координат инфинитезимального оператора  $X = \xi(x, y) \frac{\partial}{\partial x} + \eta(x, y) \frac{\partial}{\partial y}$ , допустимого по уравнению (1). Такой алгоритм, часто называемый алгоритмом Ли, состоит из следующих шагов:

- 1) Присвоение формы инфинитезимального оператора и его расширений к высшим производным с учетом конкретной формы исходного уравнения (1);
- 2) Эффект полученного оператора на уравнение, или прямой расчет производных Ли;
- 3) Переход к многообразию, заданному начальным дифференциальным уравнением, соответственно, закрытие по отношению к уравнению;
- 4) Расщепление полученного уравнения по степеням независимой переменной.

На шаге 3 мы получаем определяющее уравнение, а на шаге 4 - определяющую систему.

Полученные таким образом коэффициенты для различных степеней независимой переменной являются линейными однородными выражениями для  $\xi$  и  $\eta$  и их производными по независимым и зависимым переменным дифференциального уравнения. Условие того, что эти выражения равны нулю, также дает соответствующую определяющую систему. В силу переопределения такой системы определяющих уравнений обычно можно получить наиболее общее ее решение и, таким образом, найти полную алгебру Ли.

## **2 Метод морфологического анализа как подход к формализации проектного процесса синтеза при разработке АСУ ТП на полевом уровне**

### **2.1 Представление АСУ ТП как совокупности моделей**

С целью сокращения сроков разработки автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) на промышленных объектах необходимо использовать инструменты автоматизированного проектирования. Это актуально при выполнении задач параметрического и структурного синтеза при проектировании АСУ ТП полевого уровня, поскольку в настоящее время в инженерной практике отсутствуют способы, позволяющие по условиям технического задания (ТЗ) сразу же выбрать оптимальный набор средств автоматизации (СА). Сокращение сроков разработки проектной документации, ведет к использованию раннее применяющихся наборов СА для однотипных проектов, что со временем ведет к применению морально устарелого оборудования и необоснованной протекции определенных фирм – производителей СА, которые непосредственно повышают цены на выпускаемую продукцию.

Во избежание принятия ошибочных решений, ускорения времени проектирования в качестве информационного сопровождения этапа проектных работ необходимо иметь специализированное программное обеспечение, автоматизирующее процесс структурного синтеза.

Одним из походов проектных процедур параметрического и структурного синтеза является метод морфологического анализа, суть которого заключается в построении морфологического И/ИЛИ дерева, определяющего избыточную структуру АСУ ТП, в которой представлены все возможные варианты наборов средств автоматизации [1, 2]. Сужение пространства поиска оптимальной структуры АСУ ТП достигается за счет применения морфологических таблиц, построенных на основе классификационных признаков СА.[24]

Для расширения номенклатуры рассматриваемых проектировщиком СА необходимо перейти от ручных методов проектирования к автоматизированным, которые позволяют получить и просмотреть большое количество проектных решений при разработке структуры АСУ ТП.

Методика проектирования базируется на формализации процедуры параметрического и структурного синтеза на основе метода морфологического анализа и включает представление АСУ ТП на трех уровнях:

– 1 – й уровень - уровень идентификации, где определяются классификационные признаки необходимого средства автоматизации для разработки функционирования АСУТП;

– 2–й уровень - уровень спецификации, где составляются списки функций обследуемых классов СА и на их основе разрабатываются морфологические таблицы возможных альтернатив по каждой функции;

– 3-й уровень - уровень реализации и интеграции, где разрабатывается модель предметной области, которая представляет собой модель класса устройств, дополненную алгоритмами синтеза этих устройств по ТЗ.

Трехуровневое представление АСУ ТП есть совокупность моделей, включающая как избыточную обобщенную информационную структуру АСУ ТП, так и структуру АСУ ТП полевого уровня, удовлетворяющую требованиям ТЗ на проектирование, рисунок 9.

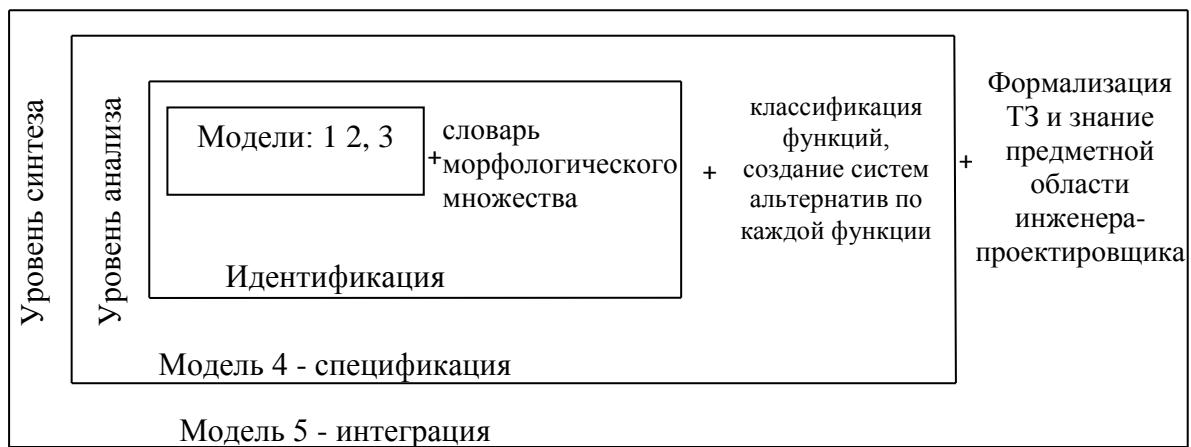


Рисунок 9 - Структура разработанной методики в виде трехуровневой интегративной модели

На уровне идентификации выделяются классификационные признаки и сводятся в систему, если присутствует несколько классов, то определяется отношение между классами, тем самым получается упорядоченное множество, представленное как взаимодействие трех моделей 1-3.

Для создания модели 1 необходимо провести морфологический анализ класса основных физических величин рабочих сред, которые измеряются, контролируются или регулируются СА, а так же факторов, влияющих на функционирование первичного средства автоматизации. Для создания модели 2 необходимо провести морфологический анализ классов СА. Модель 2 разрабатывается в виде морфологического И/ИЛИ-дерева классификации первичного СА. Модель 3 разрабатывается в виде морфологического И/ИЛИ-дерева множества типов оборудования и позволяет получить характеристики оборудования, которые непосредственно следует учитывать при выборе СА, предназначенного для установки на конкретном месте технологического объекта управления.

Модель 4 позволяет провести всесторонний анализ любого устройства принадлежащего рассматриваемому классу.[19-21] Разработанные морфологические таблицы для модели 4 позволяют провести анализ, не упустив из виду ни одного параметра, при выборе СА и рассмотреть все возможные варианты исполнения выбираемого СА, представленные на рынке. Модель 5 разрабатывается в виде морфологического И/ИЛИ дерева множества типов оборудования технологического объекта управления и является моделью 4, дополненной знаниями, необходимыми для синтеза объектов данного класса.

Рассмотрим модель 1, которая представлена виде морфологического И/ИЛИ-дерева множества функций первичного средства автоматизации, рисунок 10.

Данное морфологическое И/ИЛИ дерево множества функций первичного средства автоматизации оптимизирует практические знания инженера - проектировщика. Его использование уменьшает вероятность появления ошибки

при определении, к какому классу принадлежит первичное средство автоматизации.

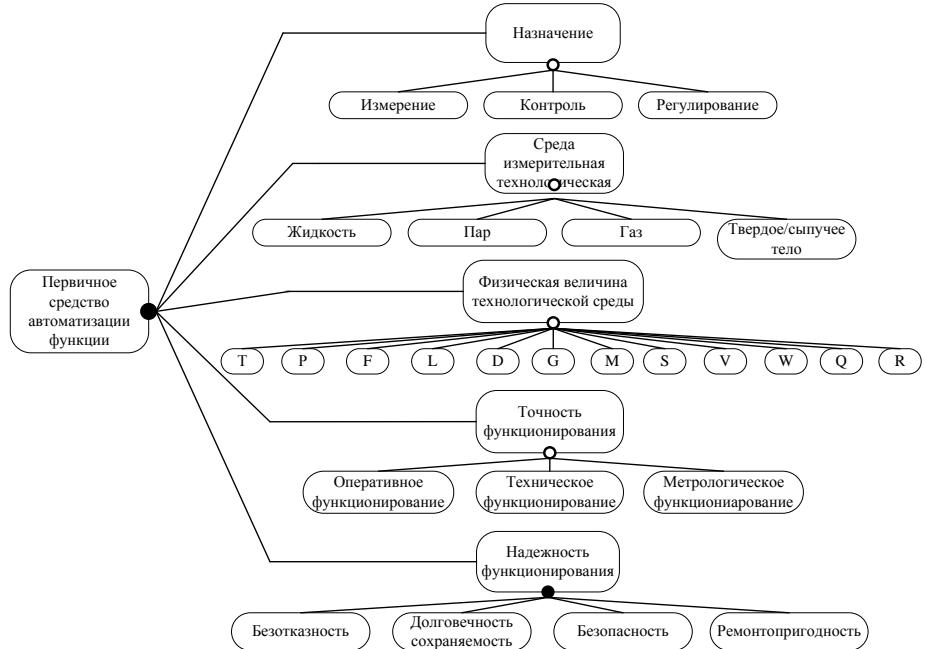


Рисунок 10 - Морфологическое И/ИЛИ дерево множества функций первичного средства автоматизации

Разработанная методика формализации выбора средств автоматизации при проектировании АСУ ТП показывает снижение трудоемкости проектных работ, выполняемых инженером-проектировщиком, расширение номенклатуры СА, уменьшение затрат и длительности, которые отводятся на разработку и выполнение технического задания. За счет актуализации информации по номенклатуре средств автоматизации в разработанных морфологических деревьях устраняется возможность выбора устаревших СА на момент получения распоряжения на проектирование АСУ ТП.

## 2.2 Разработка морфологических деревьев средств автоматизации

Структура комплекса технических средств определяет эффективность, надёжность работы и удобство эксплуатации АСУ ТП. При разработке

структуры комплекса технических средств были учтены требования, предъявляемые к современным системам управления, тенденции развития средств автоматизации и сетей передачи данных, а также пожелания заказчика в части ценовых категорий оборудования, которое было использовано для создания системы управления. АСУ ТП имеет трёхуровневую структуру. Нижний уровень АСУ ТП составляют полевые средства автоматизации: контрольно-измерительные приборы, исполнительные механизмы аналогового и дискретного действия.

И/ИЛИ дерево датчиков температуры, рисунок 11.

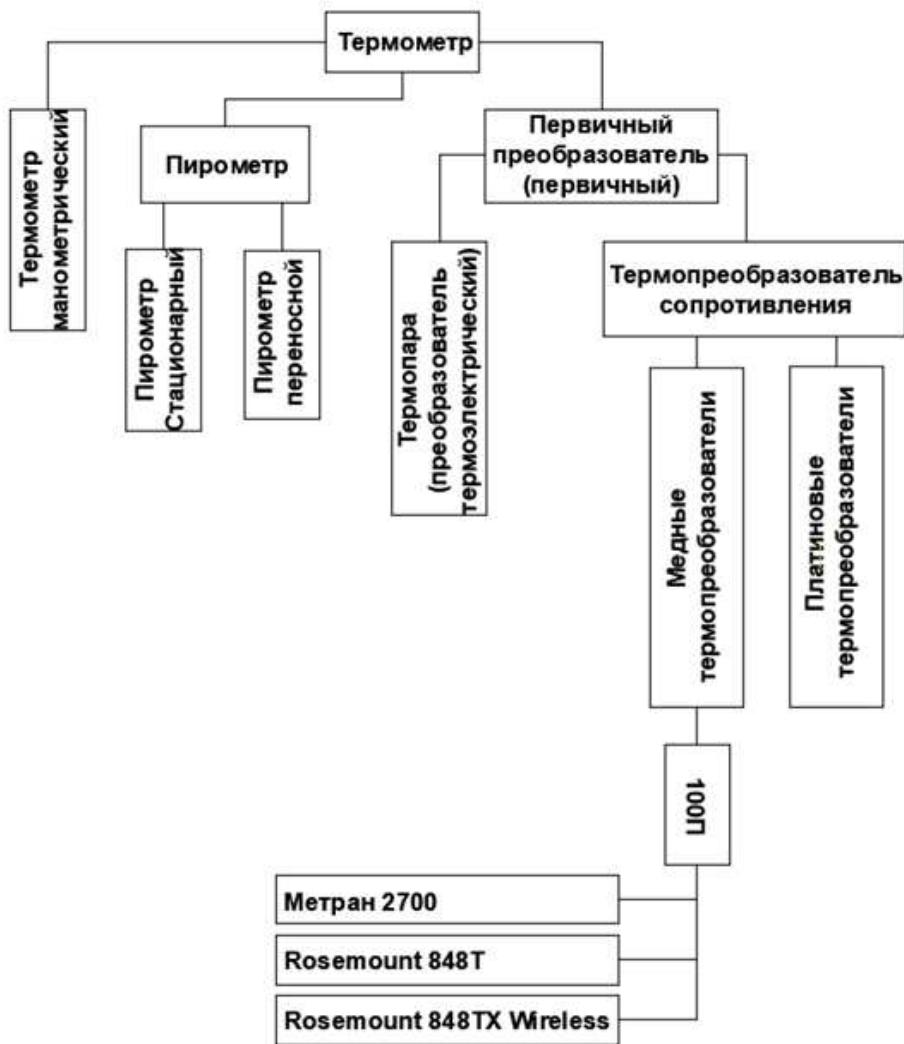


Рисунок 11 - И/ИЛИ дерево датчиков температуры

И/ИЛИ дерево датчиков расхода, рисунок 12.

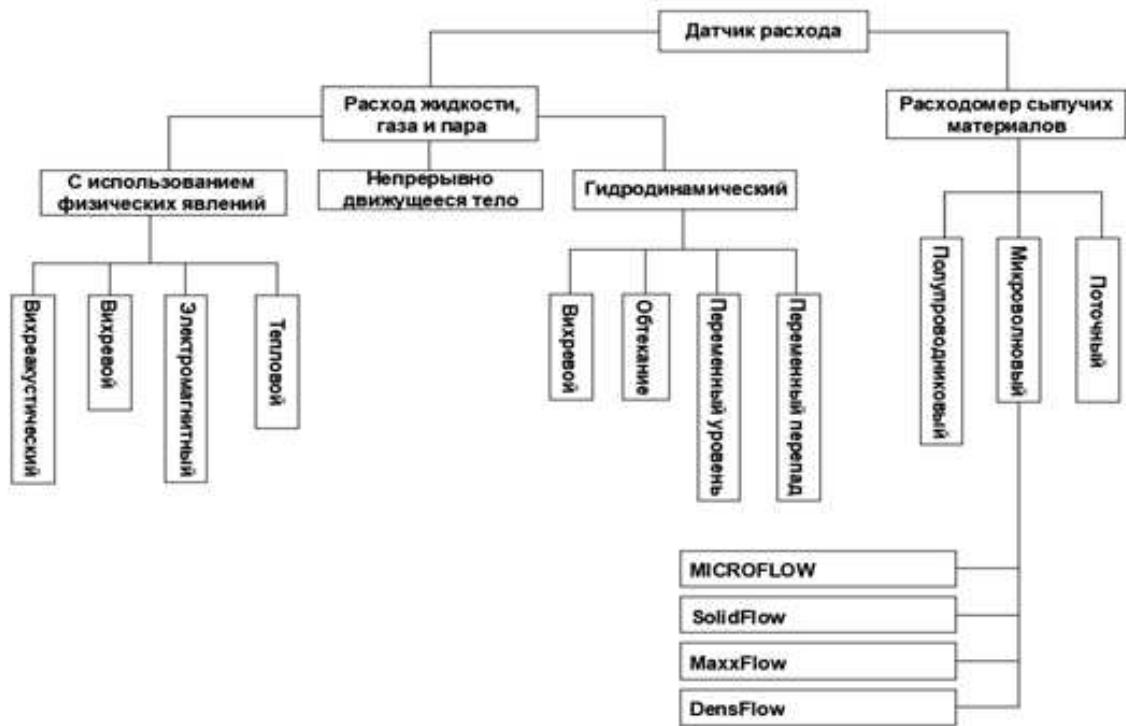


Рисунок 12 - И/ИЛИ дерево датчиков расхода

И/ИЛИ дерево датчиков уровня, рисунок 13.

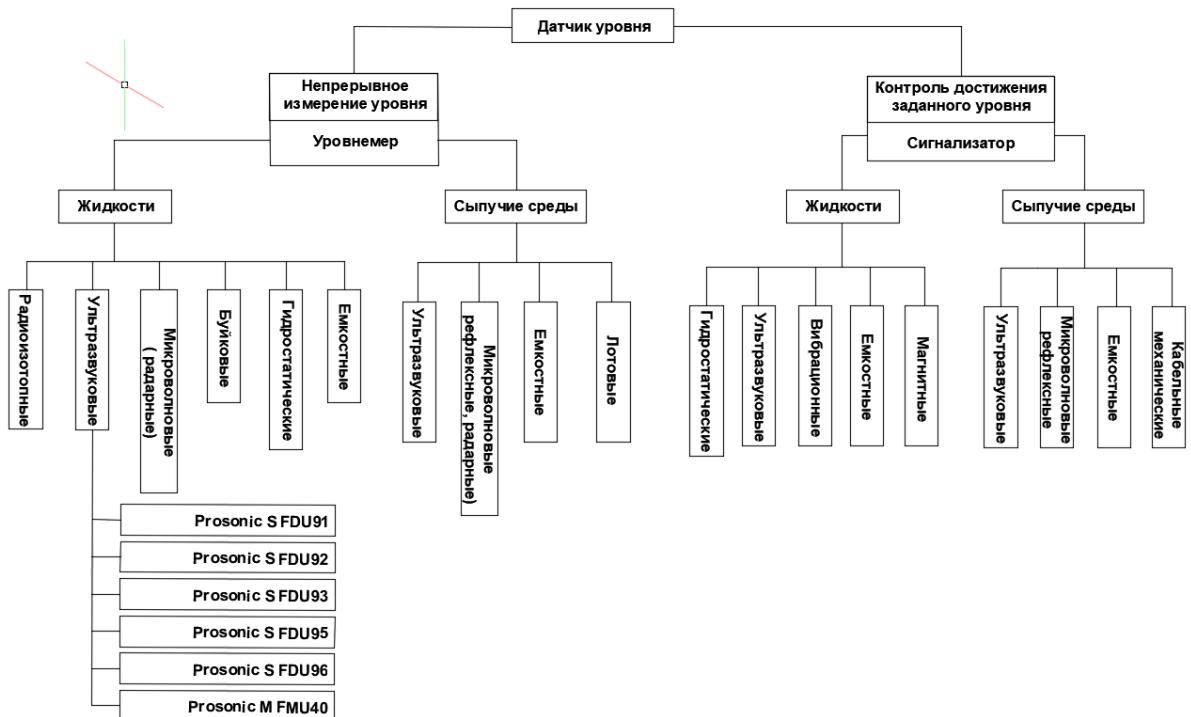


Рисунок 13 - И/ИЛИ дерево датчиков уровня

И/ИЛИ дерево датчиков давления, рисунок 14.



Рисунок 14 - И/ИЛИ дерево датчиков давления, лист 1

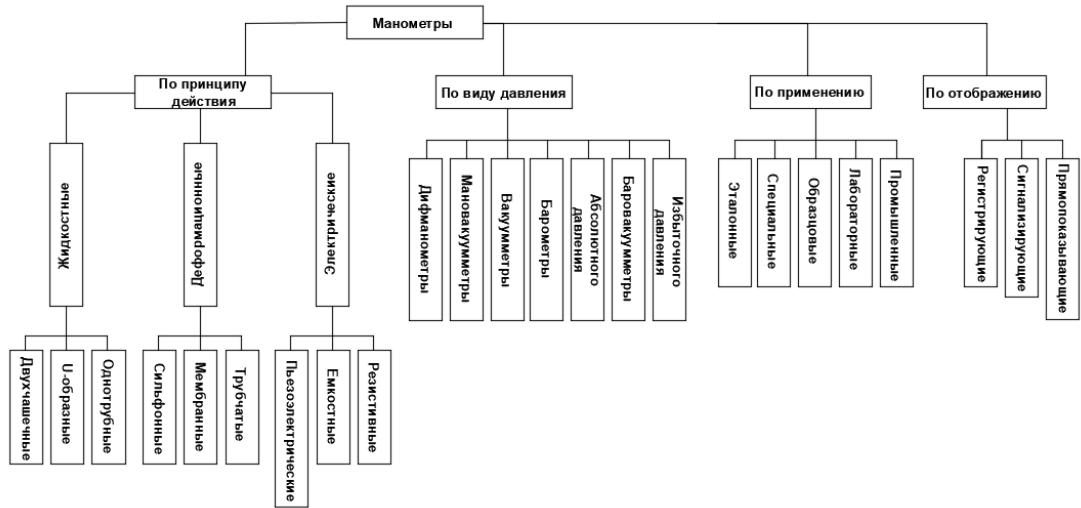


Рисунок 15, лист 2

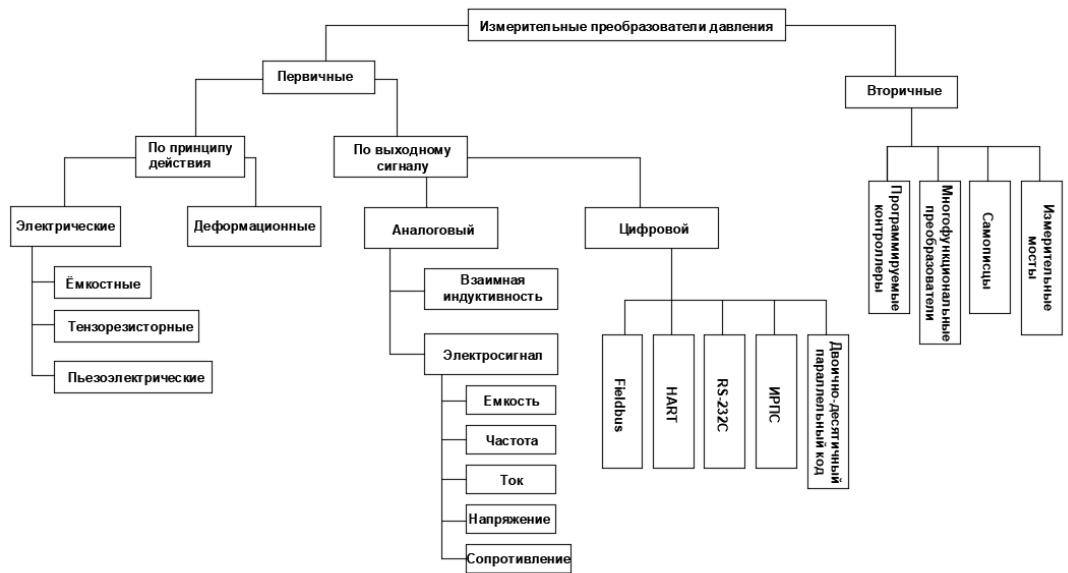


Рисунок 16, лист 3

## **2.3 Выбор полевого оборудования с использованием фрагментов И-ИЛИ деревьев**

Процесс проектирования АСУ ТП полевого уровня на современном этапе остается практически не формализованным из-за сложности целей, задач и исходных данных для проектирования. Поэтому задача формализации проектных работ при разработке АСУ ТП остается актуальной и требует решения. Одним из путей решения является формирование исходных данных для проектирования с использованием обобщенных структур на базе А-деревьев, которые будут описывать всю номенклатуру средств автоматизации (СА), используемых при разработке АСУ ТП.

В качестве исходных данных после анализа современного полевого оборудования, используемого при проектировании АСУ ТП, были составлены И-ИЛИ - деревья для всех существующих средств автоматизации, которые непосредственно будут использоваться при автоматизации проектных работ. На рисунке 17 представлен пример обобщенной структуры в виде А-дерева для такого типа СА, как расходомеры.

Аналогичные деревья составлены и реализованы для всех существующих типов СА. Для того чтобы получить по А-дереву решение задачи синтеза, нужно выполнить следующую последовательность шагов [22]:

- 1) Выбрать одну из связок, исходящих из корневой вершины:
- 2) Для каждого потомка корневой вершины выбрать по одной исходящей связке:
- 3) Продолжать этот процесс до тех пор, пока каждая из полученных вершин-потомков не станет концевой вершиной в альтернативном дереве.

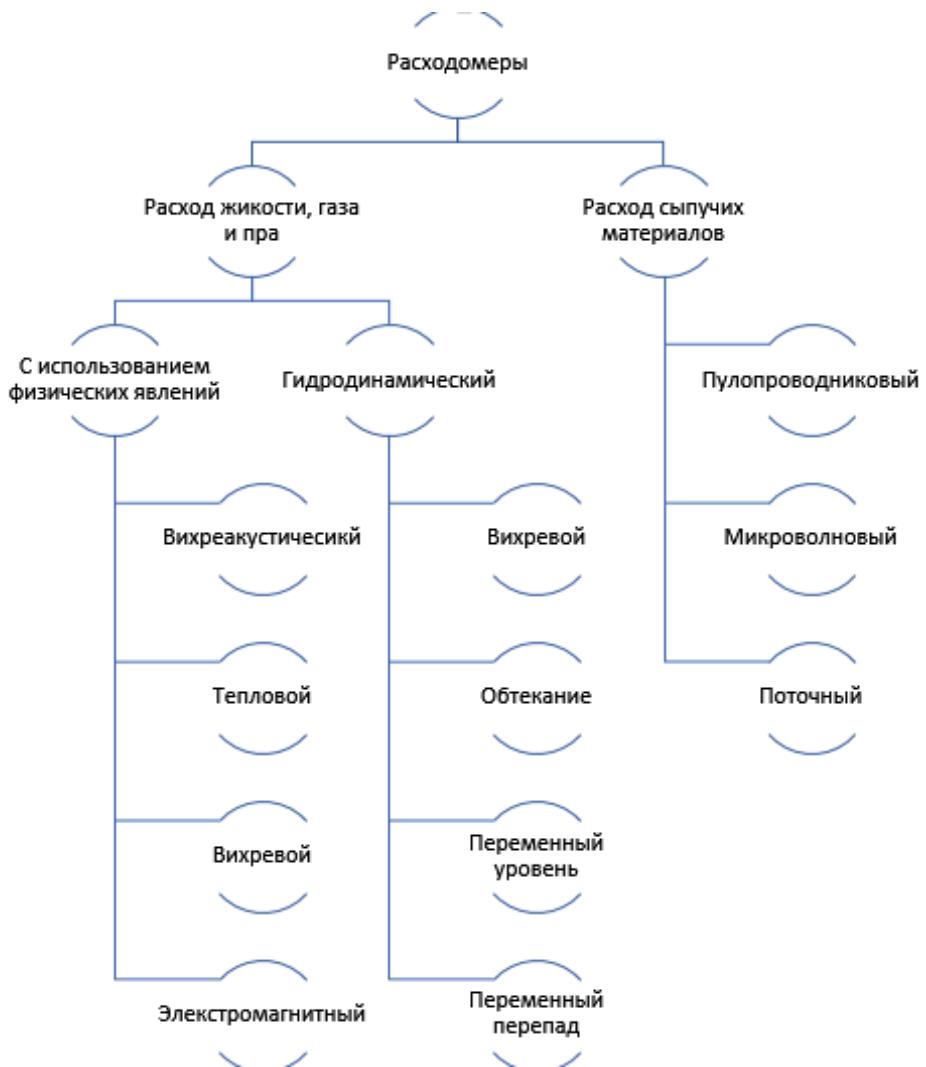


Рисунок 17 – Представление обобщенной структуры в виде А-дерева

Выбор элементов АСУ ТП проектировщиком, т.е. получение проектного решения желательно проводить за приемлемое время с использованием эргономичного инструментария. Поэтому ставится задача разработки программного средства, с помощью которого осуществляется информационное сопровождение процесса определения элементов АСУ ТП полевого уровня, которые непосредственно удовлетворяют ТЗ на проектирование. На рисунке 18 представлена совокупность программных модулей.

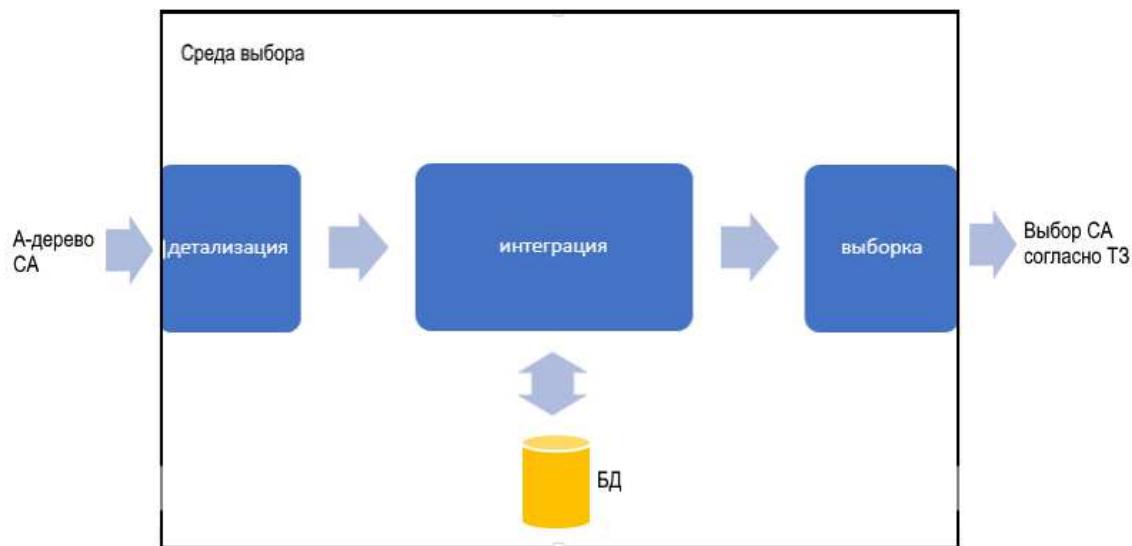


Рисунок 18 – Совокупность программных модулей

Выбор СА осложняется большой номенклатурой, как самих средств автоматизации, так и количеством их параметров согласно паспортным данным. На рисунке 19 представлена таблица детализированных параметров.

Название	Производитель	Измеряемые среды	Измеряемый расход	Давление среды	Температура среды	Режим работы	Наличие исполнений
Метран-331	Метран	Газ	5200	0,16	60	Постоянный	Взрывозащищенный
Метран-332	Метран	Газ	4500	0,1	50	Прерывистый	Взрывозащищенный
Rosemount 8600	Rosemount	Газ	6000	0,2	40	Прерывистый	Нет
Rosemount 8800	Rosemount	Газ	6000	0,1	40	Постоянный	Взрывозащищенный
Rosemount 8700	Rosemount	Жидкость	4000	40	60	Постоянный	Нет
Rosemount 8732E	Rosemount	Жидкость	4500	0,4	60	Прерывистый	Взрывозащищенный
Solidflow 10	Solidflow	Жидкость	3500	0,2	30	Постоянный	IP65
Solidflow 11	Solidflow	Жидкость	3700	0,16	50	Постоянный	IP65

Рисунок 19 – Таблица детализированных параметров

Для лучшего понимания того, что содержит в себе конкретная таблица базы данных, хранящаяся информация должна быть максимально сгруппирована. Этого можно добиться при помощи группировки данных по определенным полям, представленным в виде дерева с детализированными параметрами. На рисунке 20 представлен фрагмент дерева выбора на основе детализированных параметров.



Рисунок 20 – Фрагмент дерева выбора детализированных параметров

На рисунке 21 представлен результат выбора СА заданного типа, удовлетворяющего условиям технического задания на проектирование АСУ ТП.

Название	Производитель	Измеряемые среды	Измеряемый расход	Давление среды	Температура среды	Режим работы	Наличие исполнений
Solidflow 10	Solidflow	Жидкость	3500	0.2	30	Постоянный	IP65
Solidflow 11	Solidflow	Жидкость	3700	0.16	50	Постоянный	IP65

Рисунок 21 – Результат выбора на основе интересующих детализированных параметров

Реализация программного средства выполнена в среде программирования Microsoft Visual Studio 2017 Community на языке C#, совместно с СУБД Microsoft SQL server 2017.

### **3 Принятие проектных решений при разработке АСУ ТП полевого уровня.**

#### **3.1 Методы сравнения и оценки многокритериальных альтернатив в условиях определённости исходной информации**

##### **3.1.1 Попарное сравнение**

Лицо принимающее решение (ЛПР) производит попарное сравнение альтернатив относительно каждого критерия. Количество альтернатив небольшое, критерии как качественные, так и количественные.[23]

##### **3.1.2 Лексикографический метод**

Согласно лексикографическому методу ЛПР способен упорядочить рассматриваемые критерии по степени их значимости. Далее задается минимальное значение для каждого критерия. Затем критерии ранжируются по предпочтительности, определяется самый значимый и в отношении его решается однокритериальная задача. Если в результате этого решения остается одна альтернатива, она признается наиболее рациональной, иначе решается задача относительно следующего по важности критерия и так до тех пор, пока не останется лишь одна альтернатива.

Количество возможных для этого метода альтернатив любое, критерии могут быть любыми.

##### **3.1.3 Метод лексикографического полуупорядочивания**

Отличается от лексикографического метода возможностью использовать лишь количественные критерии. В этом методе отсеивание альтернатив не такое жесткое, в множество допустимых решений могут входить альтернативы,

оценки по критерию которых не сильно отличаются от максимальных. Количество сравниваемых альтернатив небольшое.

### **3.1.4 Метод перестановок**

В этом методе проверяются все возможные перестановки альтернатив по предпочтительности и они сравниваются между собой. Для этого критериям назначаются веса и составляется матрица принятия решений. Далее происходит построение вариантов всех перестановок и построение множества номеров критериев (для каждой пары альтернатив), значения которых согласуются с порядком альтернатив рассматриваемой перестановки. Затем определяется оценка каждой альтернативы. Возможное количество альтернатив любое, но более рационально использовать метод для небольшого количества. Критерии могут быть любыми.

## **3.2 Методы, основанные на количественном выражении предпочтений ЛПР на множестве критериев**

### **3.2.1 Метод простых приращений**

Суть метода заключается в том, что после назначения ЛПР весов критериев альтернативы сравниваются по шкале одного критерия. Использоваться могут критерии любого типа, количество альтернатив небольшое.

### **3.2.2 Метод ЭЛЕКТРА 1**

Метод ЭЛЕКТРА 1 предназначен для исключения неэффективных решений и основан на попарном сравнении альтернатив. Представим, что есть некое альтернатив с оценками по критериям и некое количество критериев, имеющих оценки. Для критериев высчитываются веса. Чтобы определить какая из альтернатив A1 или A2 превосходит другую, составляется два индекса

согласия и несогласия. Индекс согласия подсчитывается на основе весов критериев. В использованном методе этот индекс определяется как отношение суммы весов критериев подмножеств  $I^+$  и  $I^-$  к общей сумме весов.

### **3.2.3 Метод ЭЛЕКТРА 2**

Отличается от метода ЭЛЕКТРА 1 тем, что создаются по два индекса согласия и несогласия. Все альтернативы сравниваются относительно двух отношений. В результате образуется конечное множество альтернатив первого отношения, находящихся в сильном и в слабом предпочтениях. Выделяется часть менее предпочтительных альтернатив и они далее не рассматриваются. И так эта процедура повторяется еще раз и так далее. Таким образом альтернативам присваиваются ранги.

Таким же образом строится порядок второго отношения, только начиная с менее предпочтительных. Если получившиеся два списка не сильно различны, то составляется средний порядок слиянием этих списков. Этот порядок выдается ЛПР в качестве рекомендации решений задачи.

### **3.2.4 Метод ЭЛЕКТРА 3**

Метод ЭЛЕКТРА 3 применяет порог чувствительности, который считается псевдокритерием. Предпочтение той либо другой вариации формируется с применением порога чувствительности, а далее изменяется вплоть до конкретного предела. Любой альтернативе присваивается число равное разности индексов предпочтительности. Потом сортируется перечень альтернатив от условно приобретенных альтернативами чисел.

Во всех методах ЭЛЕКТРА предпочтительно, чтобы число альтернатив было не очень большим, а критерии были численными.

### 3.2.5 Метод аналитических иерархий

В методе аналитических иерархий сначала происходит расчет веса каждого критерия, а затем согласно этим весам высчитывается цена альтернативы, чем больше цена, тем предпочтительнее альтернатива.

Для расчета весов критериев они попарно сравниваются, получая оценки отношения пар критериев из которых образуется обратно симметричная матрица.

Оценки имеют следующий смысл, отображенный на рисунке 22.

Уровень важности	Количественное значение
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Существенное или сильное превосходство	5
Значительное (большое) превосходство	7
Очень большое превосходство	9

Рисунок 22 – Количественное значение оценки уровня важности

2, 4, 6, 8 - соответствующие промежуточные значения, которые используются реже.

После расчета цен альтернатив наступает время проверки согласованности суждений ЛПР. Проверка осуществляется с помощью индекса согласованности, который дает информацию о том насколько нарушена согласованность суждений. Если отклонения слишком велики и превышают некий установленный предел, то ЛПР придется перепроверить верность суждений, пересмотрев значения в матрице.

В этом методе количество альтернатив должно быть небольшим, а критерии любыми.

### **3.3 Методы, основанные на информации о допустимых значениях критериев**

#### **3.3.1 Задание минимально допустимых значений критериев**

Подход использует численные критерии, согласно значениям ЛПР устанавливает определенную границы наименьших значений, в которые обязана умещаться тот либо иной вариант. Делается сопоставление 2-ух оценок согласно шкале 1-го критерия, совокупность альтернатив делится на удовлетворительные и недостаточные. Число альтернатив любое.

#### **3.3.2 Анализ альтернатив только по критериям, для которых достигаются «наилучшие»**

Данный метод заключает задачу вносить минимум разрешенных значений критериев, а кроме того ЛПР отделяет варианты, удовлетворяющие его в большей степени. Количество альтернатив – это каждое значение, а критерии – количественные.

### **3.4 Методы, не требующие ранжирования критериев**

#### **3.4.1 Критерий Харвица**

Критерий предлагает компромисс в методах МАКСИМИН и МАКСИМАКС. Критерий Харвица считается гранью этих критериев, а цель лежит в приписывании некого веса оценкам.

Умножив итоги на надлежащие веса и суммируя их, ЛПР приобретает единый итог. Затем избирается другой вариант с максимальным значением.

### **3.4.2 Метод МАКСИМИН**

МАКСИМИН можно интерпретировать как наибольший выигрыш из тех, которые непосредственно могут быть достигнуты ЛПР в наиболее проигрышных для него ситуациях, и, таким образом, будут представлять гарантированный выигрыш. Нахождение МАКСИМИНа как математической операции условно состоит в последовательном решении простых однокритериальных задач. Количество альтернатив может быть любым, а критерии количественными.

### **3.4.3 Метод МАКСИМАКС**

Метод МАКСИМАКСа считается противоположностью метода МАКСИМИН, в данном методе отталкиваются никак не с наихудшего, а с наилучшего варианта. Число альтернатив – различное, границы – численные.

## **3.5 Методы принятия групповых решений**

### **3.5.1 Метод Дельфи**

Этот способ массовых заключений подразумевает, что эксперты, находящиеся в команде, никак не контактируют между собою всегда, а только время от времени выкладывают и обсуждают собственные предложения. В методе Дельфи планируется изменить непосредственный связь участников группы выборочными опросами либо наполнением анкет. Эксперты, заполняющие подобные анкеты, понимают только суждение, приобретенное согласованием точки зрения по абсолютно всем старым вопросам решаемой задачи. Подобным методом приобретают более четкую оценку. Варианты никак не установлены и критерии не применяются.

### **3.5.2 Метод ранжирования альтернатив**

Ранжирование альтернатив подразумевает обеспечение специалисту общее разнообразие альтернатив решения вопросов, после процесса изучения, распределение происходит согласно уровню максимального предпочтения и далее выявляет наиболее крайние варианты, которые исключаются. После происходит ранжирование варианты, которые остались и специалист вновь выкидывает крайние варианты. Таким образом, процесс не прекращается вплоть до получения конкретного варианта. Обилие альтернатив любое, критерии никак не применяются.

### **3.5.3 Метод парных сравнений**

Способ представляет поочередное представление специалистам пары альтернатив, осмотрев которые специалист вынужден предоставить для любой пары подходящее решение. Затем происходит ранжирование согласно предпочтениям. В случае если перечень с решениями довольно огромен предлагается сопоставить по 3 варианта. Данный способ именуется методом множественных сравнений. Методы отличаются только числом сравниваемых альтернатив.

### **3.5.4 Метод группового принятия решения с помощью кластеризации экспертных оценок альтернатив**

Подход базируется на применении кластеризации. Кластеризацией именуется процедура соединения альтернатив в категории, согласно принципу сходства по тому или иному свойству, признаку либо критерию. Категории именуют кластерами. ЛПР подбирает один из предлагаемых способов кластеризации оценок любого вариации и осуществляет кластеризацию по очереди согласно критериям. Выполняется расчет середин масс образованных

кластеров. Концепция «середина масс» кластера внедрена с целью вероятного учета коэффициентов компетентности специалистов, предопределяемых ЛПР. Рассчитывается «вес кластера». За её значение предполагается брать необходимую сумму коэффициентов компетентности специалистов, вступающих в кластер. Рассчитывается окончательная оценка любой вариации согласно любому из критериев.

Главным плюсом этого метода считается, то что в конечной оценке предусмотрены все без исключения кластеры. При этом воздействие любого из кластеров в данном методе в окончательную оценку соответственно его весу.

Количество альтернатив и виды критериев разные.

### **3.6 Применение методов семейства ЭЛЕКТРА при выборе полевого оборудования**

Команда французских ученых под руководством с профессором Б.Руа рекомендовала подход к попарному соотношению многокритериальных альтернатив, никак не образованный в концепции полезности. Анализ любой альтернативы считается относительной. Таким образом появился способ ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Realite). Разработана группа методов семейства ЭЛЕКТРА.

Методы ЭЛЕКТРА сосредоточены в разрешении проблемы с ранее заданными многокритериальными альтернативами. В методах никак не формируется численный коэффициент качества любой альтернативы, а уточняется исключительно критерий преимущества одного варианта над другим. Постановка задачи имеет следующий вид.

Дано:  $N$  критериев со шкалами оценок (обычно количественные), веса критериев (обычно целые числа), альтернативы с оценками по критериям.

Необходимо отметить категорию наилучших альтернатив.

Основные этапы метода:

- на базе данных оценок 2-ух альтернатив подсчитываются значения 2-ух индексов: согласия и несогласия. Данные индексы устанавливают соглашение и разногласие с догадкой, то что вариант А перекрывает вариант В;
- устанавливаются степени согласия и разногласия, с коими ведется сравнение вычисленных индексов. Когда индекс согласия больше, а индекс несогласия – меньше, тогда один превышает другую. В обратном случае варианты несравнимы;
- с большого количества альтернатив удаляются доминируемые. Остальные формируют 1-ый базис. Варианты, входящие в базис, имеют все шансы оставаться или равносильными или несравнимыми;
- вводятся наиболее «слабые» значения степеней согласия и несогласия, выделяются ядра с наименьшим числом альтернатив;
- в финальный базис помещаются лучшие варианты. Очередность базисов определяет упорядоченность альтернатив согласно качеству.

В разных способах семейства ЭЛЕКТРА индексы согласия и несогласия строятся по-всякому. Ключевые идеи построения данных индексов представлены в примере метода ЭЛЕКТРА 1.

Каждому из  $N$  критериев устанавливается в соотношение единое количество  $r$ , определяющее значимость аспекта. Б. Руа внес предложение анализировать  $r$  равно как «количество голосов» экспертов, голосующих из-за ценности этого критерия.

Выдвигается предположение о преимуществе варианта А над вариантом В. Множество  $I$ , состоящее из  $N$  критериев, разбивается на 2 подмножества:

- 1)  $I^+$  - множество критериев, по которым  $A$  лучше  $B$ ;
- 2)  $I^-$  - множество критериев, по которым  $B$  лучше  $A$ .

Далее формулируется индекс согласия с гипотезой о превосходстве  $A$  над  $B$ . (В других методах семейства ЭЛЕКТРА используются индексы сильного и слабого превосходства).

Индекс согласия подсчитывается на основе весов критериев. Так, в методе ЭЛЕКТРА 1 этот индекс определяется как отношение веса критерия подмножества  $I^+$  к общей сумме весов.

$$C_{AB} = \frac{\sum_{i \in I^+} W_i}{\sum_{i=I^-}^N W_i}, \quad (12)$$

А в методе ЭЛЕКТРА 2 индекс согласия определяется как отношение суммы весов критериев подмножеств  $I^+$  к сумме весов критериев подмножеств  $I^-$ :

$$C_{AB} = \frac{\sum_{i \in I^+} W_i}{\sum_{i \in I^-} W_i}, \quad (13)$$

Индекс несогласия  $d_{AB}$  вместе с гипотезой о превосходстве  $A$  над  $B$  находится на основе самого «несовместимого» критерия по которому  $B$  предельно превосходит  $A$ . Расчеты одинаковы как в методе ЭЛЕКТРА 1, так и в методе ЭЛЕКТРА 2

Для учета возможной разницы длин шкал критериев, разность оценок  $B$  и  $A$  относят к длине наибольшей шкалы:

$$d_{AB} = \max_{i \in I^-} \left| \frac{l_B^i - l_A^i}{L_i} \right|, \quad (14)$$

где  $l_A^i, l_B^i$  - оценки альтернатив  $A$  и  $B$  по  $i$ -му критерию;

$L_i$  - длина шкалы  $i$ -го критерия.

Укажем очевидные свойства индекса согласия

- 1)  $0 \leq C_{AB} \leq 1$ ;
- 2)  $C_{AB} = 1$ , если подмножество  $I^+$  и  $I^-$  пусто;
- 3)  $C_{AB}$  сохраняет значение при замене одного критерия на несколько с тем же общим весом.

Приведем свойства индекса несогласия

1)  $0 \leq d_{AB} \leq 1$ ;

2)  $d_{AB}$  сохраняет значение при введении более детальной шкалы по  $i$ -му критерию при той же ее длине.

Введенные индексы используются при построении матриц индексов согласия и несогласия для заданных альтернатив.

В методе ЭЛЕКТРА 1 бинарное отношение превосходства задается уровнями согласия и несогласия. Если  $C_{AB} \geq C_1$  и  $d_{AB} \leq d_1$ , где  $C_1, d_1$  - заданные уровни согласия и несогласия, то альтернатива  $A$  объявляется лучшей по сравнению с альтернативой  $B$ . Если же при этих уровнях сравнить альтернативы не удалось, то они объявляются несравнимыми.

С точки зрения внедрение определения несравнимости значительным шагом формирования концепции принятия решений. В случае если оценки альтернатив в существенной степени двойственны, в таком случае подобные противоречия совсем не возмещаются и подобные варианты сопоставлять невозможно.

Понятие несравнимости немаловажно и с фактической точки зрения. Оно дает возможность обнаружить варианты с «контрастными» оценками, равно как достойные особого исследования. Схожие идеи применяются и в иных методах семейства ЭЛЕКТРА.[25]

Необходимо выделить, что степени коэффициентов согласия и несогласия, при которых варианты сопоставимы, предполагают собою механизм рассмотрения в руках личности принимающей решение и инженера-проектировщика. Задавая данные степени со временем понижая необходимый уровень коэффициента согласия и увеличивая необходимый уровень коэффициента несогласия, они изучают существующее множество альтернатив.

При заданных уровнях в множестве альтернатив акцентируется базис недоминируемых составляющих, какие напрямую пребывают или в взаимоотношении несравнимости, или в отношении эквивалентности. При

изменении степеней с этого базиса акцентируется наименьший базис и так далее. Специалист дает личности принимающей решение всю серию допустимых решений задачи в виде всевозможных базисов. В окончательном результате допускается получить 1 оптимальную альтернативу. При данном значении индексов согласия и несогласия определяют уровень «принуждения» над данными, при которых производится итоговый вывод.

Важным плюсом способов ЭЛЕКТРА считается поэтапность раскрытия предпочтений ЛПР в ходе направления степеней согласия и несогласия и исследования базисов. Развернутый обзор дает возможность ЛПР формулировать собственные предпочтения, предопределить компромиссы среди критериев.

Использование отношения несравнимости дает возможность отметить пары альтернатив с несовместимыми оценками, остановиться в базисе, акцентирование коего довольно аргументировано с точки зрения существующей информации. Проблемы при использовании методов ЭЛЕКТРА сопряжены с назначением ЛПР весов. В ряде случаев при выделении базисов могут появиться циклы.

Данный прием оценки данных лег в основу проводимого фактического разбора данных датчиков полевого уровня.

Оценка начинается с установления цели проведения исследования:

– в случае если следует установить положение датчика в ряду подобных, в таком случае достаточно осуществить их непосредственное сопоставление согласно требуемым параметрам.

Независимо от целей, основанием сравнения датчиков, считается исследование ключевых характеристик, применяемых в этой либо другой технологии, которые обязаны рассматриваться всегда, как до начала разработки новой продукции, таким образом и в процессе её реализации.

### **3.7 Апробация методологии выбора оборудования**

На основе методов ELECTRA, была создана методика, по которой создается механизм выбора оборудования при проектировании АСУ ТП, который позволяет значительно сократить время выбора проектного решения.

В качестве апробации разработанной методики, метод реализован на объекте проектирования «Дворец спорта им. Ивана Ярыгина». Создана рабочая документация АСУТП «Проект реконструкции систем автоматизации теплового пункта Дворца спорта им. Ивана Ярыгина».

Техническое задание представляет собой документ, устанавливающий основное назначение и показатели качества ЭС, технико-экономические и специальные требования, предъявляемые к разрабатываемому изделию, стадиям разработки, составу и объему конструкторской документации.

Техническое задание составляется на основе исходного документа – заявки на разработку. В заявку на разработку входят следующие исходные данные: назначение изделия, предполагаемый изготовитель, ориентировочная потребность в изделии, стоимость разработки и сроки разработки, технико-экономическое обоснование, основные требования к конструкции и условия эксплуатации. В процессе согласования текста ТЗ эти данные подвергаются количественному анализу специалистами различных заинтересованных служб и могут существенно изменяться[26].

Техническое задание, как правило, делится на разделы, подразделы, пункты, подпункты и т.д. Многоуровневое структурирование текста ТЗ необходимо для выполнения в дальнейшем ссылок на отдельные его требования. Техническое задание, составляемое на выполнение ОКР, в общем случае имеет следующие разделы:

- общие сведения о разработке;
- технические требования;
- технико-экономические требования;

- требования к этапам и стоимости выполнения ОКР;
- порядок выполнения и приемки этапов ОКР.

В разработку было выдано ТЗ с техническими требованиями проведения модернизации спортивного объекта «Дворец спорта имени Ивана Ярыгина». Требуется выполнить обновление линейки датчиков и измерительных приборов КИПиА.

Инженеру–проектировщику необходимо провести анализ технических требований и определить, какая технологическая группа измерительных приборов и датчиков применима к существующей структуре АСУ ТП объекта «Дворец спорта имени Ивана Ярыгина».

При рассмотрении существующей структуры и технологии работы оборудования выделяются, так называемые «ограничения», которые непосредственно влияют на процесс выбора оборудования полевого уровня АСУ ТП:

- процесс искусственного отопления помещений с целью возмещения теплопотерь и поддержания заданного уровня температуры»;
- закрытая/замкнутая отопительная система;
- требуемый вид датчиков для процесса поддержки регулирования заданного уровня температуры:
  - 1) температура;
  - 2) давление;
  - 3) расход.

В процессе обследования объекта выяснилось, что система не нуждается в установке датчиков уровня.

Задача стоит в выделении той группы параметров, которые влияют на формирование выбора в определенном сегменте параметров:

- рассматриваются изменения в требованиях постоянных заказчиков продукции;
- анализируются направления развития аналогичных разработок;
- рассматриваются сферы возможного использования продукции;

- анализируется круг постоянных покупателей.

На выбор датчиков, поставляемых разными поставщиками, влияют следующие параметры: среда, диапазон измерений, первичный преобразователь, выходной сигнал, наличие взрывоисполнения и стоимость, которые непосредственно определяются по 40-ной шкале экспертным методом.

Дальнейшие «усечения» параметров для подбора датчиков несут в себе более индивидуальные параметры и уже зависят от статуса заказа и индивидуальных требований заказчика.

### **3.8 Выбор типономинала полевого оборудования с применением семейства методов ELECTRA**

Заключительный этап обследования объекта дал понять, что требуется замена трех видов датчиков:

- температура;
- давление;
- расход.

Алгоритм принятия решений представит на выбор более подходящий вариант типономинала для его замены. От инженера-проектировщика требуется ввести требуемые параметры для более усеченного подбора работы алгоритма.

Присваиваются буквенные обозначения датчикам, для более удобного сравнения.

Таблица 2 – Присвоение моделям буквенного обозначения.

Датчик А	Датчик В	Датчик С	Датчик D
Метран 150	Rosemount 248	Метран 280	Ризур TWL-R-Exia

Вводятся весовые параметры, максимальный из которых равен 40. На рисунке 23, 24 и 25 изображены весовые параметры для наших критериев, на основе проведения экспертных оценок.

Шкалы и веса критерии для задачи о выборе датчика температуры		
Критерии	Градации	Весовой параметр
Среда	Нейтральная	1
	Агрессивная	2
Диапазон измерений	-50...1000	1
	-50...1600	3
	-196...600	2
	40 ... 1000	4
	-196...300	5
	-200...1100	6
	Pt100	2
Первичный преобразователь	Pt100M	3
	100П	4
	50М	1
	4-20mA	4
Выходной сигнал	20-4 mA	3
	0-10B	5
	HART	7
	Foundation Fieldbus	5
	Profibus	7
	WirelessHART	8
	Exia	2
Наличие взрывоисполнения	Exd	3
	Нет	1
Стоимость	10000-50000	5
	50000-150000	4
	150000-200000	3
	200000-225000	2
	225000-250000	1

Рисунок 23 – Весовые параметры на основе экспертных оценок.

Данные весовые параметры будут одинаковы во всех четырех датчиках.

Таблица 3 – Расширенная оценка технических данных датчиков А, В, С и D.

Критерии	Градации	Датчики из базы данных				Весовой параметр
		Датчик А	Датчик В	Датчик С	Датчик D	
Среда	Нейтральная	0	1	0	1	1
	Агрессивная	4	4	4	4	2
Диапазон измерений	-50...1000	1	1	0	1	1
	-50...1600	3	0	0	0	3
	-196...600	2	2	2	0	2
	40 ... 1000	8	4	0	4	4
	-196...300	0	0	5	0	5
	-200...1100	6	0	6	6	6
Первичный преобразователь	Pt100	2	2	2	2	2
	Pt100M	3	3	3	0	3
	100П	4	0	4	0	4
	50М	0	1	0	0	1

Окончание таблицы 3

Критерии	Градации	Датчики из базы данных				Весовой параметр
		Датчик А	Датчик В	Датчик С	Датчик D	
Выходной сигнал	4-20mA	4	4	4	4	4
	20-4 mA	0	3	0	0	3
	0-10V	5	0	5	0	5
	HART	7	7	0	7	7
	Foundation Fieldbus	0	5	0	5	5
	Profibus	7	7	0	7	7
	WirelessHAR	0	0	8	0	8
Наличие взрывоисполнения	Exia	2	2	0	2	2
	Exd	3	0	3	0	3
	Нет	0	1	0	0	1
Стоимость*	10000-50000	5	0	0	0	5
	50000-150000	0	0	4	0	4
	150000-200000	0	3	0	0	3
	200000-225000	0	0	2	0	2
	225000-250000	1	0	0	1	1

Шкалы и веса критериев для задачи о выборе датчика температуры						
Критерии	Градации	Датчики из базы данных				Весовой параметр
		Метран 150	Rosemount 248	Метран 280	Ризур TWL-R-Exia	
Среда	Нейтральная	0	1	0	1	1
	Агрессивная	1	0	1	1	2
Диапазон измерений	-50...1000	1	1	0	1	1
	-50...1600	1	0	0	0	3
	-196...600	1	1	1	0	2
	40 ... 1000	2	1	0	1	4
	-196...300	0	0	1	0	5
	-200...1100	1	0	1	1	6
Первичный преобразователь	Pt100	1	1	1	1	2
	Pt100M	1	1	1	0	3
	100П	1	0	1	0	4
	50M	0	1	0	0	1
Выходной сигнал	4-20mA	1	1	1	1	4
	20-4 mA	0	1	0	0	3
	0-10B	1	0	1	0	5
	HART	1	1	0	1	7
	Foundation Fieldbus	0	1	0	1	5
	Profibus	1	1	0	1	7
	WirelessHART	0	0	1	0	8
Наличие взрывоисполнения	Exia	1	1	0	1	2
	Exd	1	0	1	0	3
	Нет	0	1	0	0	1
Стоимость*	10000-50000	1	0	0	0	5
	50000-150000	0	0	1	0	4
	150000-200000	0	1	0	0	3
	200000-225000	0	0	1	0	2
	225000-250000	1	0	0	1	1

Рисунок 24 – Весовые параметры и функциональная оснащенность датчиков.

Оценка функциональных показателей датчиков температуры						
Критерии	Градации	Датчики из базы данных				Весовой
		Метран	Rosemount	Метран	Ризур	
Среда	Нейтральная	0	1	0	1	1
	Агрессивная	2	0	2	2	2
Диапазон измерений	-50...1000	1	1	0	1	1
	-50...1600	3	0	0	0	3
	-196...600	2	2	2	0	2
	40 ... 1000	8	4	0	4	4
	-196...300	0	0	5	0	5
	-200...1100	6	0	6	6	6
Первичный преобразователь	Pt100	2	2	2	2	2
	Pt100M	3	3	3	0	3
	100П	4	0	4	0	4
	50M	0	1	0	0	1
Выходной сигнал	4-20mA	4	4	4	4	4
	20-4 mA	0	3	0	0	3
	0-10B	5	0	5	0	5
	HART	7	7	0	7	7
	Foundation Fieldbus	0	5	0	5	5
	Profibus	7	7	0	7	7
	WirelessHART	0	0	8	0	8
Наличие взрывоисполнения	Exia	2	2	0	2	2
	Exd	3	0	3	0	3
	Нет	0	1	0	0	1
Стоимость*	10000-50000	5	0	0	0	5
	50000-150000	0	0	4	0	4
	150000-200000	0	3	0	0	3
	200000-225000	0	0	2	0	2
	225000-250000	1	0	0	1	1

Рисунок 25 –Функциональная оснащенность датчиков на основе весовых параметров.

Проводим усредненную оценку технических данных датчиков.

Таблица 4 – Усредненная оценка технических данных датчиков А, В, С и D.

j	Критерий <i>ui</i>	Оценка в баллах				Весовой параметр
		Датчик А	Датчик В	Датчик С	Датчик D	
1	Среда	4	5	4	5	3
2	Диапазон измерений	20	7	13	11	21
3	Первичный преобразователь	9	6	9	2	10
4	Выходной сигнал	23	26	17	23	39
5	Наличие взрывоисполнения	5	3	3	2	6
6	Стоимость	6	3	6	1	15

Таблица критериев и их весов						
j	Критерий <i>ui</i>	Оценка в баллах				Весовой параметр
		Метран 150	Rosemount 248	Метран 280	Ризур TWL-R-Exia	
1	Среда	2	1	2	3	3
2	Диапазон измерений	20	7	13	11	21
3	Первичный преобразователь	9	6	9	2	10
4	Выходной сигнал	23	26	17	23	39
5	Наличие взрывоисполнения	5	3	3	2	6
6	Стоимость	6	3	6	1	15

Рисунок 26 – Усредненная оценка технических данных датчиков А, В, С и D.

Рассчитываются индексы «согласия» и «несогласия». Для этого необходимо сравнить оценки в баллах при различных конфигурациях фирм. Превосходящие факторы обозначим «+», остальные « - ».

Таблица 5 - Сравнение конфигураций датчиков

	Среда	Диапазон измерений	Первичный преобразователь	Выходной сигнал	Наличие взрывоисполнения	Стоимость
AB	-	+	+	-	+	+
BA	+	-	-	+	-	-
AC	-	+	-	+	+	-
CA	-	-	-	-	-	-
AD	-	+	+	-	+	+
DA	+	-	-	-	-	-
BC	+	-	-	+	-	-
CB	-	+	+	-	-	+
BD	-	-	+	+	+	+
DB	-	+	-	-	-	-
CD	-	+	+	-	+	+
DC	+	-	-	+	-	-

Исходя из таблицы 5, мы подставляем в формулы соответствующие весовые параметры из таблицы 1, таким образом, рассчитывая индексы «согласия» и «несогласия» для каждой конфигурации фирм.

Индексы «несогласия», как уже говорилось ранее, рассчитываются по формуле 14, причем длина шкалы  $L = 40$ .

Расчет данного индекса одинаков как для ЭЛЕКТРА 1, так и для ЭЛЕКТРА 2.

Для расчета индексов «согласия» и «несогласия» использован Microsoft Excel, это значительно облегчило необходимые расчеты.

При помощи Microsoft Excel можно анализировать большие массивы данных. В Microsoft Excel можно использовать большое количество математических, статистических, финансовых и других специализированных функций, связывать различные таблицы между собой, выбирать произвольные форматы представления данных, создавать иерархические структуры.

<b><u>Таблица индексов несогласия</u></b>						
	Среда	Диапазон измерений	Первичный преобразователь	Выходной сигнал	Наличие взрывоисполнения	Стоимость
AB	0,025	-0,325	-0,075	0,075	-0,05	-0,075
BA	-0,03	0,325	0,075	-0,075	0,05	0,075
AC	0	-0,175	0	-0,15	-0,05	0
CA	0	0,175	0	0,15	0,05	0
AD	0,025	-0,225	-0,175	0	-0,075	-0,125
DA	-0,03	0,225	0,175	0	0,075	0,125
BC	-0,03	0,15	0,075	-0,225	0	0,075
CB	0,025	-0,15	-0,075	0,225	0	-0,075
BD	0	0,1	-0,1	-0,075	-0,025	-0,05
DB	0	-0,1	0,1	0,075	0,025	0,05
CD	0,025	-0,05	-0,175	0,15	-0,025	-0,125
DC	-0,03	0,05	0,175	-0,15	0,025	0,125

Рисунок 27 – Расчёт индексов несогласия в Microsoft Excel.

Таблица 6 – Расчёт индексов несогласия в Microsoft Excel.

	Среда	Диапазон измерений	Первичный преобразователь	Выходной сигнал	Наличие взрывоисполнения	Стоимость
AB	0,033	-0,433333333	-0,1	0,1	-0,066666667	-0,1
BA	-0,033	0,433333333	0,1	-0,1	0,066666667	0,1
AC	0	-0,233333333	0	-0,2	-0,066666667	0
CA	0	0,233333333	0	0,2	0,066666667	0
AD	0,033	-0,3	-0,233333333	0	-0,1	-0,166667
DA	-0,033	0,3	0,233333333	0	0,1	0,1666667
BC	-0,033	0,2	0,1	-0,3	0	0,1
CB	0,033	-0,2	-0,1	0,3	0	-0,1
BD	0	0,133333333	-0,133333333	-0,1	-0,033333333	-0,066667
DB	0	-0,133333333	0,133333333	0,1	0,033333333	0,0666667
CD	0,033 3	-0,066666667	-0,233333333	0,2	-0,033333333	-0,166667
DC	-0,033	0,066666667	0,233333333	-0,2	0,033333333	0,1666667

Затем рассчитывается индекс «согласия» для метода ЭЛЕКТРА 1 по следующей формуле 12. Учитывая, что максимальная сумма весов равна 94.

Далее рассчитывается индекс «согласия» для метода ЭЛЕКТРА 2 по формуле 13.

Тем самым, с помощью прикладной программы Microsoft Excel мы вычисляем важности подмножеств по которым  $X$  «предпочтительнее»  $Y$ , либо  $Y$  «предпочтительнее»  $X$  (см. таблицу 7).

Таблица 7 - Важность подмножеств  $P^+(x, y)$ ,  $P^-(x, y)$

	A	B	C	D
A				
P+	*	52	66	52
P-	*	42	28	42
		94	94	94
B				
P+	42	*	42	70
P-	52	*	52	24
	94		94	94
C				
P+	0	46	*	52
P-	94	48	*	42
	94	94		94
D				
P+	3	21	42	*
P-	91	73	52	*
	94	94	94	

Строятся матрицы индексов «согласия» и «несогласия» для ЭЛЕКТРА 1 и для ЭЛЕКТРА 2. При построении матрицы индексов «несогласия» выбирают максимальные показатели, таблица 8, таблица 9 и таблица 10.

Таблица 8 - Матрица согласия (ЭЛЕКТРА 1)

	A	B	C	D
A	-	0,55319149	0,70212766	0,553191
B	0,446809	-	0,446808511	0,744681
C	0	0,4893617	-	0,553191
D	0,031915	0,22340426	0,446808511	-

Таблица 9 - Матрица несогласия (ЭЛЕКТРА 1 и ЭЛЕКТРА 2)

	A	B	C	D
A	-	0,1	0	0,033333
B	0,433333	-	0,2	0,133333
C	0,233333	0,3	-	0,2
D	0,3	0,13333333	0,233333333	-

Таблица 10 - Матрица согласия (ЭЛЕКТРА 2)

	A	B	C	D
A	-	1,23809524	2,357142857	1,238095
B	0,807692	-	0,807692308	2,916667
C	0	0,95833333	-	1,238095
D	0,032967	0,28767123	0,807692308	-

В соответствии с правилами об индексах согласия и несогласия – в качестве пороговых значений для ЭЛЕКТРА 1 зададим  $c_1 = 0,1$  и  $d_1 = 0,3$ , а для ЭЛЕКТРА 2 –  $c_2 = 0,6$  и  $d_2 = 0,5$  и таким образом найдем значения превосходства одной фирмы над другой, таблицы 11 и 12, используя прикладную программу Microsoft Excel.

Пороговые значения				
c1	d1	c2	d2	
0,1	0,3	0,6	0,5	
$C_{ab} \geq C_1$			$d_{ab} \leq d_1$	
Таблица превосходства вариантов в ELECTRA 1				
	A	B	C	D
A	-	+	+	+
B	-	-	+	+
C	-	+	-	+
D	-	+	+	-
Таблица превосходства вариантов в ELECTRA 2				
	A	B	C	D
A	-	+	+	+
B	+	-	+	+
C	-	+	-	+
D	-	-	+	-

Рисунок 28 – Построение таблиц превосходства в Microsoft Excel.

Таблица 11- Таблица превосходства вариантов в ЭЛЕКТРА 1

	A	B	C	D
A	-	+	+	+
B	-	-	+	+
C	-	+	-	+
D	-	+	+	-

Таблица 12 - Таблица превосходства вариантов в ЭЛЕКТРА 2

	A	B	C	D
A	-	+	+	+
B	+	-	+	+
C	-	+	-	+
D	-	-	+	-

Таким образом, на основании таблиц превосходства температурных датчиков, выявился наиболее подходящий типономинал, для внедрения его в полевой уровень. Им будет являться **Датчик А** – Метран 150 (для него по методам ELECTRA и ELECTRA II получено максимальное количество плюсов при попарном сравнении фирм).

На основе примера подбора датчика температуры были подобраны типономиналы:

- датчик давления «Rosemount 2051L»;
- датчик расхода «Rosemount 8700».

Результаты подбора типономинала замены датчика давления представлены в таблице 13 и 14, методов семейства ЭЛЕКТРА 1 и ЭЛЕКТРА 2, соответственно.

Таблица 13- Таблица превосходства вариантов в ЭЛЕКТРА 1

	A	B	C	D
A	-	+	-	-
B	+	-	-	-
C	+	+	-	+
D	+	+	-	-

Таблица 14 - Таблица превосходства вариантов в ЭЛЕКТРА 2

	A	B	C	D
A	-	-	-	-
B	+	-	-	-
C	+	+	-	+
D	+	+	-	-

Результаты подбора типономинала замены датчика расхода представлены в таблице 15 и 16, методов семейства ЭЛЕКТРА 1 и ЭЛЕКТРА 2, соответственно.

Таблица 15- Таблица превосходства вариантов в ЭЛЕКТРА 1

	A	B	C	D
A	-	+	-	+
B	+	-	-	-
C	+	+	-	+
D	+	+	-	-

Таблица 16 - Таблица превосходства вариантов в ЭЛЕКТРА 2

	A	B	C	D
A	-	+	-	-
B	-	-	-	+
C	+	+	-	+
D	+	+	-	-

### 3.9 Сформированная структура

На основе существующей технологической структуры цели модернизации и усеченного подбора, сформирована структура замены типономиналов на объекте «Дворец Спорта имени Ивана Ярыгина», рисунок 29.

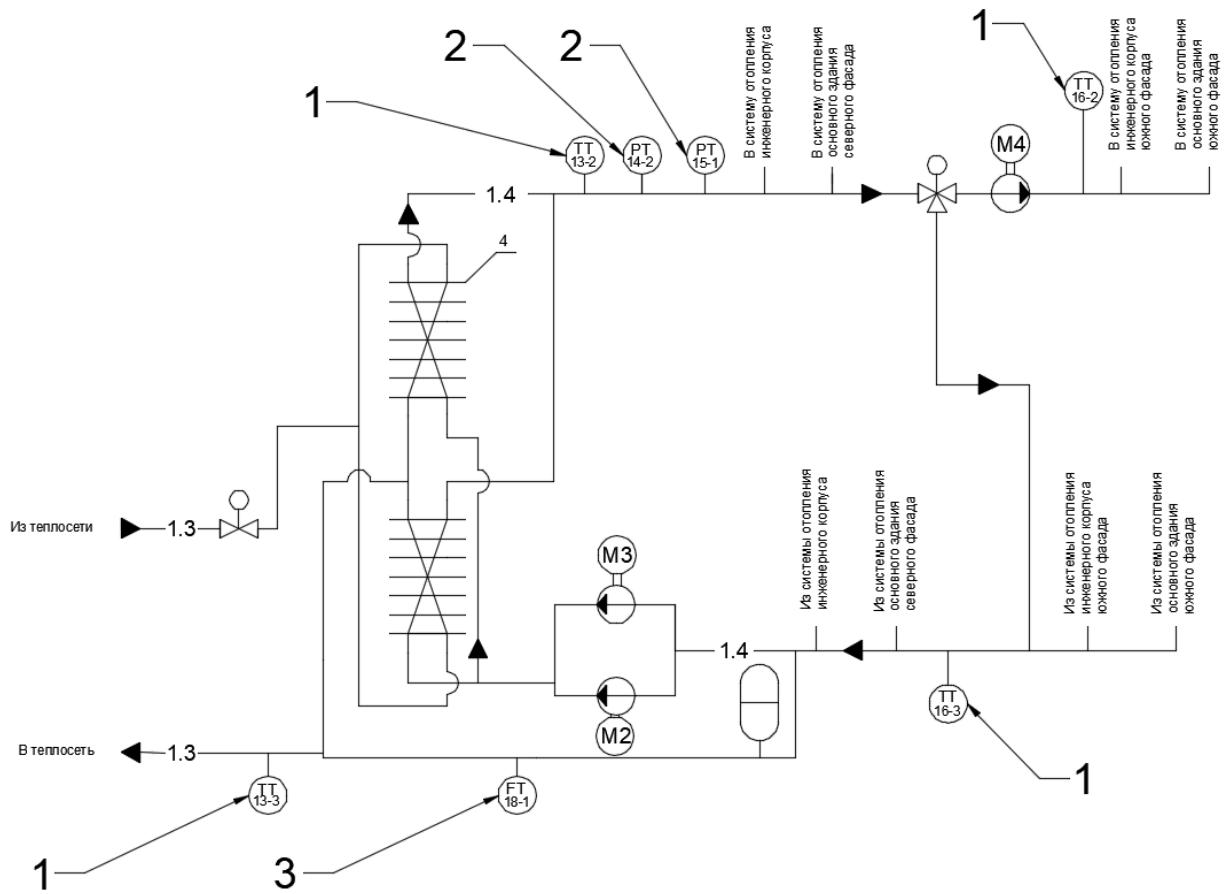


Рисунок 29 – Структура замены типономиналов на объекте проектирования

Цифрам соответствует требуемая замена типономинала, соответственно:

- 1) 1 – датчик температуры «Метран 150»;
- 2) 2 – датчик давления «Rosemount 2051L»;
- 3) 3 – датчик расхода «Rosemount 8700».

Таким образом, на примере модернизация участка системы отопления на объекте «Дворец Спорта имени Ивана Ярыгина» показана апробация предложенной методологии выполнения проектной процедуры синтеза АСУ ТП на полевом уровне на основе методов принятия решений семейства Электра. Полученная структура участка системы отопления удовлетворяет заданным параметрам: среда, диапазон измерений, первичный преобразователь,

выходной сигнал, наличие взрывоисполнения и стоимость, что соответствует, нахождению многокритериального критерия оптимальности.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результатом выполнения магистерской диссертации является методология решения задачи синтеза структуры АСУ ТП на полевом уровне, включающая:

- формализацию предметной области всей номенклатуры существующих средств автоматизации используемых в качестве полевого оборудования; формализация осуществлена через представление всей номенклатуры полевого оборудования в виде обобщенных структур на базе И/ИЛИ деревьев;
- на базе разработанной совокупности И/ИЛИ деревьев средств автоматизации реализовано программное средство автоматизирующее выбор полевого оборудования удовлетворяющего ТЗ в виде средств автоматизации, которые можно рассматривать как исходные данные для решения задач структурного синтеза АСУ ТП;
- проектная процедура синтеза АСУ ТП реализована с использованием пороговых методов принятия решений на базе семейства Электра;
- задача технической оптимизации решена как задача многокритериальной оптимизации, с участием эксперта, а именно, опытного инженера-проектировщика АСУ ТП.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Норенков, И.П. Автоматизированное проектирование: учеб. пособие для вузов. / И.П. Норенков. - Москва: Академия, 2000. С. 187 с.
- 2 Автоматизированное проектирование средств и систем управления, учеб. пособие для студентов вузов / Е. Е. Носкова, Д. В. Капулин, С. В. Ченцов; Сиб. федерал. ун-т. - Красноярск: ИПК СФУ, 2011. С. 188-189.
- 3 Норенков, И.П., Автоматизированные системы управления технологическими процессами. / И.П. Норенков // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 2002. - №1. С. 10-14.
- 4 Понятие об автоматизированных системах управления технологическим процессом (АСУТП) [Электронный ресурс] : Общая функциональная схема современного производства. – Режим доступа: [https://studopedia.ru/2\\_120697\\_ponyatie-ob-avtomatizirovannih-sistemah-upravleniya-tehnologicheskim-protsessom-asutp.html](https://studopedia.ru/2_120697_ponyatie-ob-avtomatizirovannih-sistemah-upravleniya-tehnologicheskim-protsessom-asutp.html)
- 5 Интегрированная автоматизированная система управления и безопасности (ИСУБ) [Электронный ресурс] : Технические требования на поставку. – Режим доступа: [http://zakupki.rosneft.ru/files/zakup/45939/2016-05/230954/add/0523ПАСУ0001\\_0.pdf](http://zakupki.rosneft.ru/files/zakup/45939/2016-05/230954/add/0523ПАСУ0001_0.pdf)
- 6 Одрин В. М. Морфологический анализ систем. / В.М. Одрин, С.С. Карташов. - Киев: Наукова думка, 1977. - С. 148.
- 7 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства изменений. Метрология. Основные термины и определения. [Электронный ресурс]: РМГ 29-99. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200082099>
- 8 ГОСТ 14691-69 "Устройства исполнительные для систем автоматического регулирования" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-14691-69>
- 9 KollerR. Konstruktionsmethodfur den Maschinen-, Gerate- und Apparatenbau. Springer. Berlin [West.], Heidelberg, New- York, 1976.

- 10 Общие сведения о САПР [Электронный ресурс]: Уровни и этапы проектирования ЭВМ. – Режим доступа: <http://bav-second.narod.ru/index2.html>
- 11 Подходы к решению задач структурного синтеза [Электронный ресурс]: Задачи структурного синтеза и принятия решений. – Режим доступа: [http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=190\\_CAD/6002.mod/?cou=140\\_CADedu/CAD.cou](http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=190_CAD/6002.mod/?cou=140_CADedu/CAD.cou)
- 12 Морфологические таблицы [Электронный ресурс] : Результаты морфологического анализа. – Режим доступа: [http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=190\\_CAD/6003.mod/?cou=190\\_CAD/base.cou](http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=190_CAD/6003.mod/?cou=190_CAD/base.cou)
- 13 Альтернативные графы [Электронный ресурс] : И-ИЛИ-деревья. – Режим доступа: [http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=190\\_CAD/6004.mod](http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=190_CAD/6004.mod)
- 14 Методы распространения ограничений [Электронный ресурс] : Распространение ограничения. – Режим доступа: <http://pandia.ru/text/79/062/92757.php>
- 15 Методы структурного синтеза [Электронный ресурс] : Направленный поиск по И—ИЛИ дереву. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/1196260/page:26/>
- 16 Метод морфологического ящика [Электронный ресурс] : Алгоритм решения проблемы. – Режим доступа: <http://structuralist.narod.ru/dictionary/morphbox.htm>
- 17 Чяпяле, Ю. М. Метод технического творчества. / - Вильнюс: Мокслас, 1985. – С. 12-18.
- 18 Zwicky, F. Discovery, Invention, Research. - Through the Morphological Approach, Toronto: The Macmillan Company, 1969. - С. 5-8.
- 19 Акимов, С.В. Четырехуровневая интегративная модель для автоматизации структурно-параметрического синтеза // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. 2004. № 171. - С. 165-173.
- 20 Акимов, С.В. Мультиагентная модель автоматизации структурно-параметрического синтеза // Системы управления и информационные технологии, 2005, № 3 (20). С. 45-48.

- 21 Акимов С.В. Архитектура распределенной системы структурно-параметрического синтеза // Сборник докладов: Международная НТК «Единое информационное пространство ‘2004» / Днепропетровск. - 2004. - С. 21-24.
- 22 Структурный синтез по альтернативным деревьям [Электронный ресурс] : Язык А-деревьев. – Режим доступа: <http://mylektsii.ru/7-79978.html>
- 23 Система поддержки принятия решений по выбору тура [Электронный ресурс] : Методы ППР. – Режим доступа: <https://studwood.ru/1584574/>
- 24 Акимов, С.В. Введение в морфологические методы исследования и моделирование знаний предметной области. [Электронный ресурс]: Морфологический анализ и морфологический синтез. – Режим доступа: <http://www.structuralist.narod.ru>
- 25 Теория принятия решений. Методические указания к практическим занятиям (часть первая) [Электронный ресурс] : методы ELECTRE. – Режим доступа: <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/1292/3/00322.pdf>
- 26 Техническое задание и его анализ [Электронный ресурс] : Техническое задание. – Режим доступа: <https://poisk-ru.ru/s19107t2.html>
- 27 Состав полевого оборудования в АСУ ТП. [Электронный ресурс] : Нижний уровень. – Режим доступа: <http://helpiks.org/2-71345.html>

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**Приложение А - Акт внедрения об использовании результатов выпускной квалификационной работы**

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

Кафедра «Системы автоматики, автоматизированное управление и  
проектирование»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
 С.В. Чентцов  
«20» июня 2018 г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

### ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ПОЛЕВОГО УРОВНЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АСУ ТП

Направление 27.04.04 Управление в технических системах

Магистерская программа 27.04.04.01 Интегрированные системы управления  
производством

Научный руководитель

  
20.06.2018

доц., канд. техн. наук  
Е.Е. Носкова

Выпускник

  
20.06.2018

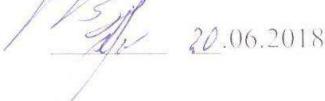
Д.А. Шапрун

Рецензент

  
20.06.2018

доц., канд. техн. наук  
Е.П. Моргунов

Нормоконтролер

  
20.06.2018

Т.А. Грудинова

Красноярск 2018