

## **СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ**

### **3.1 Определение, назначение и основные особенности экспертных систем**

Одним из направлений развития систем искусственного интеллекта являются экспертные системы (ЭС). Данные системы представляют мощные компьютерные системы, основанные на знаниях. В литературе используется также название «интеллектуальные системы, основанные на правилах». Основы построения экспертных систем изложены, в частности, в [22, 23, 29].

Предметной областью экспертных систем (ЭС), может быть, например, автоматическое управление мехатронными и робототехническими устройствами или технологическими процессами, реализуемыми с помощью средств робототехники и мехатроники. Решения, предлагаемые ЭС, могут быть представлены в виде результатов диагностики, советов лицу, принимающему решения, или в виде команд, автоматически изменяющих структуру и значения параметров средств управления мехатронными и робототехническими устройствами.

При решении задач управления сложными многопараметрическими и взаимосвязанными системами, объектами управления, производственными и технологическими процессами приходится решать неформализуемые либо трудноформализуемые задачи. Они отличаются тем, что:

- алгоритм решения задачи неизвестен, исходные данные неоднозначны, неполны или противоречивы;
- знания о решаемой проблеме недостаточны для формализации задачи, поскольку они неоднозначны, неполны и противоречивы;

- для принятия решения необходимо использовать не только данных в числовом формате, но и информацию, содержащуюся в изображениях, рисунках, знаках, буквах, словах и звуках;
- предполагается наличие выбора способа решения задачи между многими вариантами в условиях неопределенности, но поиск наилучшего решения путём перебора вариантов оказывается затруднительным в результате очень большой размерности пространства возможных решений;
- данные и знания о проблеме не остаются постоянными, а изменяются в процессе функционирования системы управления.

К числу таких задач относятся диагностика, управление, интерпретация и прогнозирование. Кроме того, речь может идти о задачах проектирования, отладки, планирования, наблюдения и обучения. Подобные задачи возникают при создании робототехнических, станочных, транспортных, авиационных и космических систем. Их решение требуется и других областях жизнедеятельности человека, например, в нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности, в медицине, в области телекоммуникаций и связи. Наибольшее применение ЭС нашли в области создания систем для определения диагноза заболевания, месторождения полезных ископаемых, проектирования машин и механизмов, управления реакторами и решения ряда других задач [24, 25].

*Под экспертной системой (ЭС) будем понимать интеллектуальную вычислительную систему (в простейшем случае – программу для ЭВМ), которая в конкретной узкоспециализированной предметной области использует знания специалистов-экспертов и в пределах этой области способна принимать ре-*

шения, по качеству не уступающие решениям эксперта-профессионала.

Широкое внедрение ЭС в различные области человеческих знаний началось в 80-е и 90-е годы прошлого века. Технология ЭС позволила реализовывать человеческие знания на больших вычислительных машинах. Во многом успех ЭС обусловлен присутствием им важными свойствами [26, 27]:

- высокой эффективностью экспертной системы, которая достигается благодаря развитой базе знаний и применяемым методам решения задач;
- использованием эвристических, экспериментальных, субъективных знаний экспертов в определенной предметной области при решении неформализованных или слабоформализованных задач.

Следует отметить ряд важных *особенностей экспертных систем*. Во-первых, являясь интеллектуальной системой, ЭС моделирует механизм мышления человека. Благодаря этому ЭС способна рассуждать при сомнительных и противоречивых исходных данных. Но эта её способность характерна для решения задач только в определённой предметной области. Поэтому возможности ЭС всегда ограничены той предметной областью, на которую она ориентирована.

Во-вторых, главным итогом работы ЭС являются порождаемые ею соображения и выводы, основанные на знаниях, которыми она располагает. Для получения этих результатов ЭС могут выполнять разнообразные вычислительные и логические операции.

В основе ЭС три наиболее важных компонента: *база знаний, решатель* и *подсистема объяснений*. Знания в ЭС записаны на специальном языке и хранятся в *базе знаний*. База знаний

представляет собой специфическую память ЭС. Наиболее часто используется представление знаний в виде *продукционных правил*, фреймов, о которых речь пойдёт ниже. Особо следует отметить уникальность базы знаний ЭС, поскольку она содержит знания о конкретной предметной области, которые неограниченное число раз могут быть использованы для решения разнообразных задач.

Программный модуль формирования выводов представляет собой отдельную универсальную часть ЭС. Такой программный модуль называется *решатель* или *машина логического вывода*. Он создаётся отдельно от базы знаний и не зависит от предметной области. С помощью решателя обрабатываются введённые данные о процессе или текущем состоянии системы и делаются соответствующие выводы. Проводя аналогию с человеком, можно считать, что решатель – это «мозг» ЭС.

Для принятия решений ЭС используют эвристические и приближенные методы, опирающиеся на опыт, навыки и интуицию экспертов. Особенность таких методов состоит в том, что они дают решение, не требуя исчерпывающей и непротиворечивой исходной информации. Но в отличие от теоретических и алгоритмических методов, характерных для решения строго формализуемых задач, они не всегда гарантируют успех. ЭС не отвергают и не заменяют традиционного подхода к решению задач, возникающих при построении робототехнических и мехатронных устройств, которые могут быть формализованы, данные системы расширяют функциональные возможности робототехнических и мехатронных систем, особенно при сочетании традиционных подходов и методов построения ЭС.

Важной особенностью ЭС является её способность объяснить сделанные ею выводы. Для этого используется подсистема объяснений. Она представляет собой программный модуль, рас-

крывающий пользователю цепочку рассуждений ЭС и дающий сведения о том, каким образом получен результат работы ЭС. Эта подсистема может быть полезна при отладке, выявлении ошибок и модернизации ЭС.

Главная особенность экспертной системы состоит в том, что её знания не статичны. Она способна развиваться, накапливать, систематизировать и сохранять новые знания, характерные для определенной предметной области и отражающие профессиональный опыт экспертов, наилучшим образом решающих поставленные задачи. Экспертная система работает в двух режимах:

1. Режим решения и выполнения поставленной задачи;
2. Режим приобретения и изменения полученных ранее знаний.

Подводя итог, можно сказать, что *экспертная система* - это компьютерная программная система, которая в определенной предметной области способна рассуждать так же, как это делает человек-эксперт, используя для этого *базу знаний*, имеющиеся данные и *процедуру логического вывода*.

ЭС должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- база знаний ЭС должна содержать необходимый объём знаний по конкретному объекту управления;
- должно быть организовано представление знаний в предметной области, на которую ориентирована ЭС, а также управление ими;
- ЭС должна осуществлять логический вывод на основании знаний, имеющихся в базе знаний, и данных, хранящихся в базе данных;
- пользовательский интерфейс должен обеспечивать правильную передачу информации пользователю о решениях, принимаемых ЭС;

- должен быть механизм приобретения и получения знаний экспертной системой, которые она получает от экспертов;
- в составе ЭС должен быть модуль советов и объяснений, который позволит пользователю получать комментарии, прилагаемые к заключениям, сделанным ЭС, объясняющие мотивы принятых решений.

Для осуществления интеллектуального управления динамическими системами, характерными для робототехники и мехатроники, экспертная система должна удовлетворять следующим специфическим требованиям:

- уметь работать с большими объёмами знаний и данных при относительно небольших массах и объёмах аппаратных средств, используемых для реализации экспертной системы;
- обращаться к различным разделам знаний и осуществлять поиск решений, отвечающих цели управления;
- принимать решения, обеспечивающие надежное и эффективное функционирование системы управления в условиях неполноты знания об окружающей среде;
- быстродействие экспертной системы должно быть достаточным для реализации управления *в реальном времени*.

Важную роль при создании ЭС играют способы представления знаний и используемые языки программирования. В настоящее время нашли применение средства программирования, применяемые при разработке ЭС: языки CLISP и PROLOG, а также экспертные системы-оболочки, например, KEE, CENTAUR, G2 и GDA, CLIPS, AT\_ТЕХНОЛОГИЯ, [29, 30].

### 3.2 Структурная схема экспертной системы

Экспертную систему, являющуюся интеллектуальной системой и предназначенной для решения задач управления, следует рассматривать состоящей из подсистем управления высшего и низшего уровней (рис. 3.1). Входом системы высшего уровня является блок ввода информации. Он предназначен для ввода числовых данных, текста, речи, данных от систем обработки информации, поступающей от разнообразных датчиков и оператора, управляющего экспертной системой.

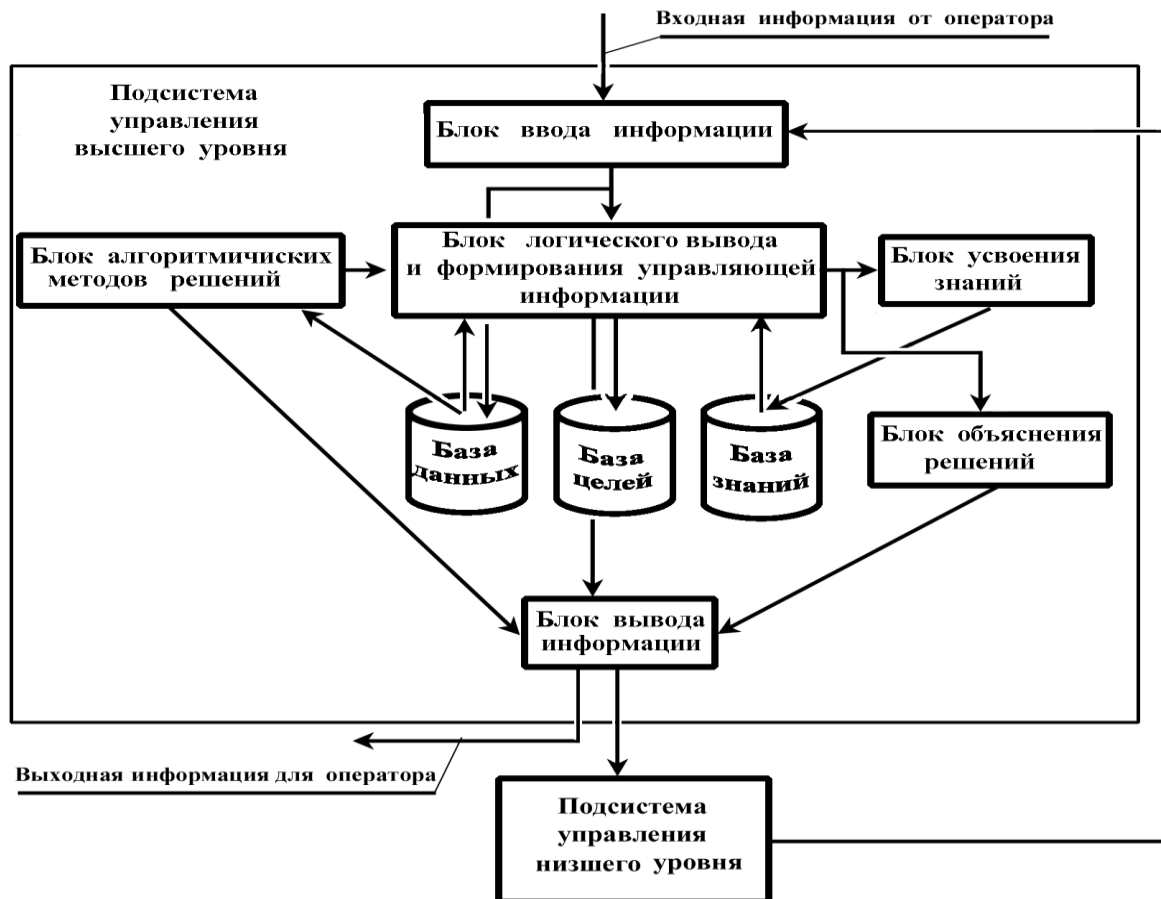


Рисунок 3.1 Структурная схема экспертной системы

Входная информация поступает в блок логического вывода и далее в базы знаний и данных. База знаний (БЗ) - это совокупность таблиц, в которых размещена символьная и числовая информация об объекте управления или автоматизируемом технологическом процессе, обрабатываемых изделиях, инструменте и станочном оборудовании.

Блок логического вывода и формирования управляющей информации обеспечивает нахождение решений для нечётко формализованных задач. Он осуществляет планирование действий и формирование управляющей программы для системы низшего уровня на основе информации из базы знаний (БЗ), БД, базы целей (БЦ) и блока алгоритмических методов решений. БД – это совокупность правил и действий, которые необходимо выполнить с объектом либо с процессом. БЦ – это множество локальных целей системы, представляющих собой совокупность знаний, активизированных в конкретный момент и в конкретной ситуации для достижения глобальной цели. Это отдельные запрограммированные действия, выполняемые в зависимости от информации, получаемой от датчиков контроля и оператора, управляемого ЭС.

Для решения задач в предметной области, выполняемых по жёстким алгоритмам, используются программные модули, входящие в состав блока алгоритмических методов решений. ЭС осуществляет динамический анализ знаний, изменяет и сохраняет их в базе знаний и базе данных с помощью входящего в её состав блока усвоения знаний.

Важную роль играет блок объяснения решений. Он служит для объяснения предлагаемой системой последовательности логических операций и используемых программ решения задач. Для технологических систем это могут быть программы выпол-



нения движений инструмента робота относительно обрабатываемой детали.

Блок вывода информации служит для передачи информации, сформированной на выходе системы высшего уровня, на вход системы низшего уровня. Такая передача должна осуществляться в реальном времени. Важна обратная связь с системы низшего уровня на вход блока ввода информации системы высшего уровня. Она даёт возможность реализовать адаптивное управление и обучение интеллектуальной системы.

При проектировании ЭС её эксперты и инженеры по знаниям наполняют базу знаний и базу целей знаниями о технологическом процессе и обрабатываемых деталях, а программисты разрабатывают программы, реализующие алгоритмы решения задач. Базы знаний и данных на начальном этапе создаются специалистами-экспертами, а далее пополняются в процессе эксплуатации интеллектуальной системы.

Одной из областей, в которых интеллектуальные системы управления нашли широкое применение, является робототехника. Даже само понятие робот часто воспринимается как интеллектуальная система. Исторический экскурс и различные аспекты интеллектуальных робототехнических систем изложены, например, в курсе лекций по интеллектуальным робототехническим системам [28]. Особенностью многих интеллектуальных систем является использование модели внешнего мира. Поэтому экспертные системы также содержат переменную настраиваемую модель внешнего мира и реальную исполнительную систему с объектом управления. Цель и управляющие воздействия формируются в такой системе на основе знаний об окружающей среде и свойствах объекта управления. Решения об управлении могут приниматься на основе результатов моделирования движений

объекта управления в виртуальном мире и в дальнейшем они реализуются реальной системой.

Интеллектуальные системы должны уметь из набора фактов выделять существенные, из имеющихся фактов и знаний делать выводы, используя дедукцию, аналогии, индукции. Кроме того, интеллектуальные системы должны выполнять самооценку своих действий и иметь для этого средства контроля, то есть средства для оценки результатов собственной работы, должны уметь обобщать сходство между имеющимися фактами.

Последовательность действий интеллектуальной системы может выглядеть следующим образом. Сначала производится интерпретация сведений, поступающих на вход блока ввода информации на некотором внешнем языке. В результате этого происходит преобразование информации к виду, пригодному для работы с символьной моделью экспертной системы. Это даёт возможность активизировать блок логического вывода и формирования управляющей информации. В свою очередь, этот блок выбирает из базы данных множество правил, проверяет правила на модели технологического процесса и исполнительной системы совместно с объектом управления. Реализуя заданную стратегию принятия решений, блок логического вывода и формирования управляющей информации выбирает правило из базы данных и проверяет его исполнение на модели внешнего мира и исполнительной системы совместно с объектом управления. Эта процедура заканчивается, как только будут выполнены и проверены все правила из базы данных на модели внешнего мира и исполнительной системы с объектом управления. После проверки всех правил описание найденного таким образом решения преобразуется блоком вывода информации к виду, понятному подсистеме управления низшего уровня.

Низший уровень системы управления технологическим процессом (рис. 3.2) включает объект управления и внешнюю среду, с которой этот объект взаимодействует.



Рисунок 3.2 Система управления низшего уровня для технологического процесса механической обработки

Объект управления представляет собой совокупность исполнительных манипуляционных механизмов. Их перемещение по заданным законам  $R_d$  и  $R_i$  осуществляют исполнительные двигатели, которые входят в состав исполнительных механизмов. Устройство управления получает информацию о положении зве-

ньев исполнительных механизмов, скоростях движения, ускорениях и силах от датчиков, расположенных в шарнирах этих звеньев.

Основная функция систем управления низшего уровня состоит в формировании законов движения исполнительных механизмов в реальном времени  $U_{\text{и}}(t)$  и  $U_{\text{д}}(t)$ . Эти системы, представляющие собой следящие приводы, в совокупности обеспечивают движение рабочего органа по заданной траектории с требуемой точностью, скоростью и усилием. Выходными координатами манипуляционных механизмов являются  $R_{\text{и}}$  и  $R_{\text{д}}$ . Исполнительные приводы манипуляционного механизма создают усилие  $P(t)$ , которое воздействует на исполнительные органы.

На систему управления низшего уровня передаётся управляющее воздействие  $U(t)$  с блока вывода решений системы высшего уровня. Управляющее воздействие  $U(t)$  формируется в реальном времени и представляет собой программу действий, выбранную из некоторого множества  $U(t) \in U$ . Какую из программ следует выбрать, решает система высшего уровня на основе результатов моделирования и указаний оператора, взаимодействующего с системой. Сигналы обратной связи  $R(t)$  могут нести информацию о состоянии системы управления низшего уровня, часто передаваемой логическими сигналами, и о состоянии внешней среды, например, о её температуре и о состоянии сопутствующих устройств.

### 3.3 Представление знаний в экспертных системах

Человек-эксперт, работая в хорошо известной ему прикладной области, успешно оперирует знаниями, проявляя мастерство и успешно пользуясь практическими навыками. Но эксперты не всегда могут точно описать причины, по которым они принимают те или иные решения.

Решение задачи транслирования имеющегося у специалиста опыта и знаний на формальный язык вычислительной системы возлагается на инженера по знаниям. Для упрощения решения этой задачи создётся концептуальная модель. Она представляет собой промежуточный результат преобразования опыта и знаний эксперта в программу. Под концептуальной моделью понимается построенная инженером по знаниям модель, являющаяся формальной базой знаний и определяющая смысловую структуру предметной области. Естественно, что она отличается от модели эксперта, и как промежуточное проектное решение, является своеобразным шаблоном. При построении концептуальной модели должны учитываться потребности конечных пользователей.

Для организации баз знаний в экспертных системах было предложено несколько способов и языков представления знаний, ориентированных на автоматическую обработку современными компьютерными системами. Формальные компьютерные языки представления знаний появились в 1980-х годах. С их помощью были предприняты попытки занести в базы знаний в закодированном виде значительные массивы общечеловеческого знания. Среди языков программирования, ориентированных на представление знаний, можно выделить разработанный в 1972 году язык логического программирования «Пролог». Он описывает высказывания и позволяет делать выводы из известных посылок. Поэтому представление данных и знаний, использующее логиче-

ские выводы и модели, может основываться на языке «Пролог». Для представления знаний применяются и другие языки, например, СусL, IKL, KIF, Loom, OWL, KM.

При созднании экспертных систем могут использоваться формальные и неформальные модели представления знаний. Особенность неформальных моделей состоит в том, что логический вывод не подчинён какой-либо строгой теории, а определяется разработчиком. Поэтому он должен учесть все возможные ситуации и отвечает за корректность работы ЭС. В результате этого неформальная модель не обладает универсальностью и может использоваться только для конкретной предметной области знаний. Основой функционирования более универсальных формальных моделей представления знаний является математическая теория. Поэтому корректность осуществляемого на их базе логического вывода обусловлена использованием строгих аксиоматических правил.

Для представления знаний в экспертных системах широко используются **семантические сети**, использующие неформальные модели представления знаний. Семантическая сеть «англ. Semantic Network» - *информационная модель предметной области, имеющая вид ориентированного графа, вершины которого соответствуют объектам в предметной области, а дуги (ребра) задают отношение между ними.*

В названии семантической сети соединены термины из двух наук: семантики и теории сетей. Семантика представляет собой раздел лингвистики, изучающий смысловое значение единиц языка. Лингвистика (от латинского слова *lingua*, означающего язык) является наукой, изучающей языки, и является частью семиотики, которая, в свою очередь, представляет собой науку о знаках.

Сеть в математическом понимании представляет собой разновидность графа, образованного набором вершин, соединённых дугами (рёбрами), которым присвоено некоторое число. Граф (от английского слова *graph*) является совокупностью непустого множества вершин и наборов пар вершин, характеризующимися связями между вершинами. Объекты представляются как вершины, называемые также узлами графа, а связи задаются дугами (рёбрами).

В семантической сети вершины – это понятия базы знаний, а дуги задают отношения между ними и при этом обладают направленностью [36]. Поэтому семантическая сеть отражает семантику предметной области в виде понятий и отношений.

В семантическую сеть включаются не все объекты предметной области, а только те из них, которые необходимы для решения конкретных прикладных задач. Вершины сети (события, действия, обобщенные понятия или свойства объектов) соединяются дугой, если соответствующие этим вершинам объекты находятся в каком-либо отношении. Среди них можно выделить следующие отношения: «*является*», которое означает, что объект входит в состав некоторого класса; «*имеет*», которое используется для задания свойств объектов; «*является следствием*», отражающим причинно-следственные связи, и «*имеет значение*», применяемое для задания значений свойств объектов.

Характерный пример семантической сети, описанный в [47], представлен на рис. 3.3. В этой сети используются такие понятия базы знаний, как млекопитающее, животное, медведь, кошка, позвоночник, кит, вода. Связи могут быть разного вида, например,

- связи, определяющие тип объектов;
- функциональные связи;
- количественные связи;

- пространственные связи;
- временные связи;
- атрибутивные связи;
- логические связи.

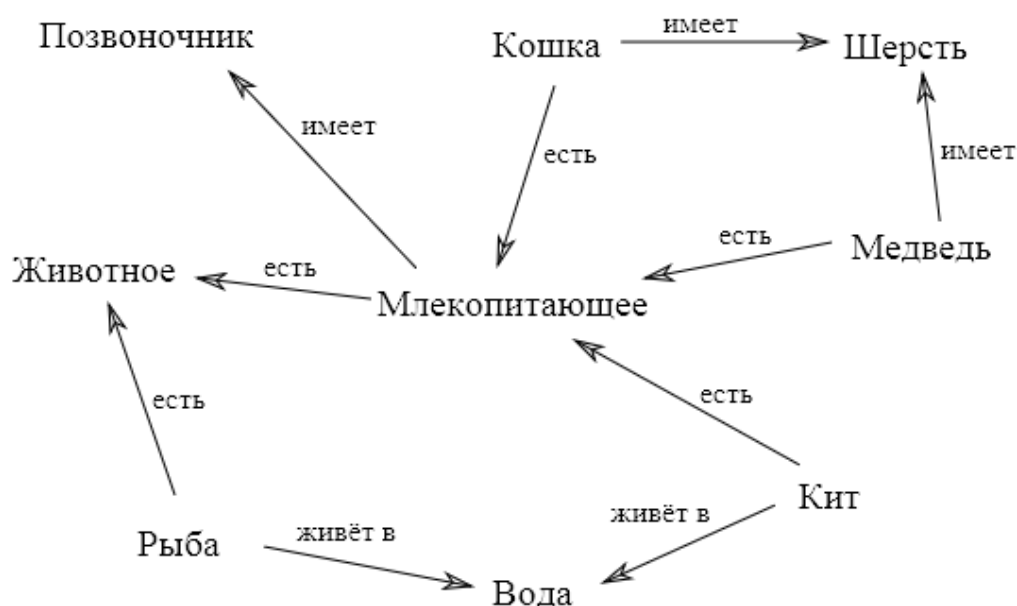


Рис. 3.3. Пример семантической сети

Один из известных способов представления знаний, основанных на семантических сетях, реализован в системе MultiNet (Multilayered Extended Semantic Networks, что переводится как многослойные расширенные семантические сети).

**Представление знаний в виде правил** можно считать наиболее понятным и популярным способом их формального представления. Он применяется чаще всего в тех случаях, когда знания возникают в результате обобщения опыта, накопленного экспертами в результате их длительной работы по решению конкретных задач.



Предметные знания представляются набором правил, состоящих из двух частей и имеющих вид «если» «то». В экспертных системах, в которых знания представлены в таком виде, обработку информации и формирование выходных данных осуществляет интерпретатор правил. Входная информация о текущей ситуации проверяется на выполнение первой части правил, т.е. условий «если». Для тех правил, для которых входная информация удовлетворяет условию «если», выполняются действия, предусмотренные частью правила «то». В этом случае принято говорить, что правило срабатывает. Интерпретатор правил контролирует выполнение всех правил по принципу **«сопоставить - выполнить»** и в результате этого формирует последовательность действий ЭС.

Для описаний знаний используется также понятие фрейм (англ. слово frame означает кадр, рамку). Он имеет имя и набор атрибутов. В свою очередь, атрибуты (характеристики определённой области знаний), называемые слотами, обладают значениями (наполнителями слотов). Например, фрейм привод может содержать слоты мощность, скорость и момент. Таким образом, в области искусственного интеллекта фрейм обозначает структуру, содержащую описание объекта в виде атрибутов и их значений. Особенность рассматриваемой модели состоит в том, что в слоте могут храниться не только значения, но и имена процедур и правил, с помощью которых производятся вычисления значений. Так же, как и семантические сети, фреймовые структуры объектно-ориентированы и хорошо подходят для представления знаний в виде схем, дают возможность в явной форме хранить сведения в базе знаний [35] и являются альтернативой по отношению к представлению знаний в виде правил.

### 3.4 Этапы разработки экспертных систем

Разработку экспертных систем принято разделять на шесть основных этапов.

Этап 1. Этап идентификации, который состоит в ответе на вопрос, что необходимо сделать.

Этап 2. Концептуализация, представляющая собой содержательный анализ проблемной области, выявление используемых понятий и их взаимосвязей, определение методов решения задач. Этот этап завершается созданием модели предметной области (ПО). Она включает основные правила и критерии качества их выполнения. На этапе концептуализации определяются особенности решения задачи. К ним относятся

- исходные и выводимые данные,
- подзадачи, на которые разбиваются исходные задачи; используемые стратегии и гипотезы;
- виды взаимосвязей между объектами ПО, типы используемых отношений, например, причина – следствие, часть – целое;
- процессы, используемые в ходе решения;
- состав знаний, необходимых для решения задачи;
- типы ограничений, накладываемых на процессы, используемые в ходе решения;
- состав знаний, используемых для обоснования решений.

Этап 3. Формализация, в результате которой все ключевые понятия и отношения выражаются на некотором формальном языке. Он выбирается из числа уже существующих языков или создается заново. Таким образом, на данном этапе определяются состав средств и способы представления декларативных и процедурных знаний, осуществляется их представление и в итоге

формируется описание решения задачи ЭС на формальном языке.

Итогом третьего этапа является описание того, как рассматриваемая задача может быть представлена в выбранном или разработанном формализме. Сюда относится указание способов представления знаний (фреймы, сценарии, семантические сети и т.д.) и определение способов манипулирования этими знаниями (логический вывод, аналитическая модель, статистическая модель и др.) и интерпретации знаний.

Этап 4. Программная реализация экспертной системы. На данном этапе по результатам тестирования и опытной эксплуатации создается конечный продукт (прототип), пригодный для промышленного использования. Работа по его созданию состоит в программировании его компонентов или выборе их из известных инструментальных средств и наполнении базы знаний.

Главное в создании прототипа заключается в том, чтобы этот прототип обеспечил проверку адекватности идей, методов и способов представления знаний решаемым задачам. Создание первого прототипа должно подтвердить, что выбранные методы решений и способы представления пригодны для успешного решения, по крайней мере, ряда задач из актуальной предметной области, а также продемонстрировать тенденцию к получению высококачественных и эффективных решений для всех задач предметной области по мере увеличения объема знаний.

Этап 5. Этап тестирования, заключающийся в проверке конечного продукта на математической модели. При этом производится оценка выбранного способа представления знаний в ЭС в целом.

Различают источники неудач в работе системы: тестовые примеры, ввод-вывод, правила вывода, управляющие стратегии. Поэтому при подготовке тестовых примеров следует классифи-

цировать их по предметной области, выделяя стандартные случаи, определяя границы трудных ситуаций и т.п. В частности, для технологического процесса – это знание последовательности его выполнения.

Этап 6. Этап эксплуатации. На этом этапе проверяется пригодность ЭС для пользователя. Она определяется в основном удобством работы с ней и её полезностью. Под полезностью ЭС понимается её способность в ходе диалога определять потребности пользователя, выявлять и устранять причины неудач в работе, а также удовлетворять указанные потребности пользователя, т.е. правильно решать поставленные задачи. В свою очередь, удобство работы с ЭС подразумевает:

- естественность взаимодействия с ней, общение в привычном, не утомляющем пользователя виде,
- гибкость ЭС – способность системы настраиваться на различных пользователей, а также учитывать изменения в квалификации одного и того же пользователя,
- устойчивость системы к ошибкам (способность не выходить из строя при ошибочных действиях неопытного пользователя).

В ходе разработки ЭС почти всегда осуществляется её модификация. Выделяют следующие виды модификации системы: переформулирование понятий и требований, переконструирование представления знаний в системе и усовершенствование прототипа.

### **3.5 Экспертные системы для управления движением мобильных роботов**

Место наиболее эффективного применения экспертных систем в иерархической структуре системы управления мобильных роботов определяется преимуществами и недостатками экспертных систем. К достоинствам экспертных систем, важных для построения систем управления роботами, относятся следующие.

- Простота реализации. Экспертная система может быть реализована на базе любого языка программирования и часто без дополнительных библиотек и компиляторов.
- Удобство реализации системы, оперирующей с логическими или дискретными входными сигналами.
- База знаний, содержимое которой понятно эксперту и пользователю.
- Возможность контроля действий, предлагаемых ЭС, простота поиска и устранения ошибок.

Вместе с тем, при построении систем управления роботами приходится учитывать недостатки, которыми обладают экспертные системы. Во-первых, к ним относится сложность реализации плавного управления. Решения, принимаемые ЭС всегда дискретны, поскольку ЭС работают с ограниченным числом правил, соответствующих принятому разбиению значений непрерывных сигналов на ряд диапазонов. Увеличение количества таких диапазонов не всегда приводит к успеху, т.к. при этом значительно увеличивается число правил, делает базу знаний трудно обозримой, увеличивает сложность восприятия, контроля и настройки базы знаний, а также существенно увеличивает затраты времени на принятие решения.

Экспертные системы могут использоваться на стратегическом, тактическом и исполнительном уровнях иерархических си-

стем управления движением роботов. ЭС наиболее эффективны и просто реализуются на стратегическом уровне системы управления, который служит для выбора цели и управления поведением робота, формируя последовательность принципиально важных (стратегических) действий, приводящих к достижению этой цели. Простота реализации ЭС на стратегическом уровне обусловлена тем, что ЭС получает в основном дискретные входные данные, логическая обработка которых и выработка дискретного управляющего воздействия могут быть легко осуществлены с помощью компьютера.

Тактический уровень системы управления роботом обеспечивает формирование управляющих воздействий на приводы колёс робота с учётом фактической сложившейся обстановки. При этом учитываются положение робота и цели в пространстве и наличие препятствий на пути движения к цели. Поэтому ЭС на тактическом уровне управления должна принимать, обрабатывать и формировать непрерывные сигналы. Это ведёт к существенному увеличению объёма базы знаний, например, к росту количества продукционных правил и к вызванному этим снижению быстродействия ЭС и ухудшению динамических свойств робота. Тем не менее, в ряде случаев использование ЭС на тактическом уровне управления оказывается вполне оправданным.

Применение экспертных систем на исполнительном уровне системы управления мобильного робота также возможно, но встречает те же трудности, что и на тактическом уровне. Вместе с тем, сочетание ПИ- и ПИД-регуляторов с перестраиваемыми параметрами и экспертных систем позволяет получить новое, более высокое качество систем управления движением.

Пример построения экспертной системы управления автономным движением интеллектуального мобильного робота в среде с препятствиями рассматривается, в частности, в [42]. Для

определения своих координат мобильный робот должен иметь навигационную систему, построенную на основе инерциальной системы, GPS, ГЛОНАСС или системы контроля перемещений робота по информации, поступающей от датчиков на колёсах робота. Кроме того, система управления роботом должна иметь систему оучувствления, позволяющую определять препятствия на пути, например, на основе лазерных дальномеров.

Способ формирования управляющих воздействий на исполнительные устройства зависит от особенностей робота. В качестве конкретной модели робота будем рассматривать робот, кинематическая схема которого похожа на схему робота Pioneer 3-DX [46]. Робот имеет два независимо управляемых ведущих колеса и одно колесо поддерживающего типа. Особенность такого робота состоит в том, что, если робот должен двигаться по прямой, скорости вращения ведущих колёс имеют одинаковые значения. Для поворота робота задаются различные скорости вращения ведущих колёс.

Задача управления состоит в том, чтобы в среде с препятствиями обеспечить достижение роботом целевой точки, заданной её координатами  $x_{Ц}$  и  $y_{Ц}$  в декартовой системе координат  $OXY$ . При этом робот должен отклоняться от опасностей слева и справа, а если их нет, то направляться к цели.

Правила экспертной системы определяют скорость движения робота следующим образом. Если опасности прямо нет, то скорость формируется в зависимости от расстояния до цели. Если опасность есть, робот останавливается. Значения координат целевой точки задаются в виде констант. Они могут вырабатываться самостоятельно стратегическим уровнем системы управления робота либо поступать с пульта управления от человека-оператора по радиоканалу или с применением кабельной связи.

С помощью навигационной системы определяются координаты робота  $x_P$ ,  $y_P$  и угол азимута его ориентации  $\alpha_P$  в той же системе координат  $OXY$ , в которой заданы координаты целевой точки (рис. 3.4).

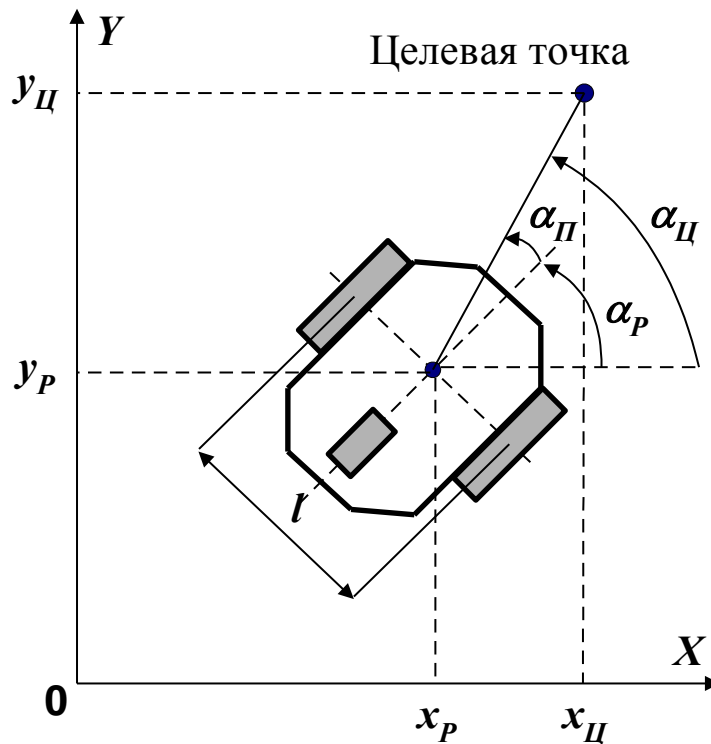


Рисунок 3.4 Мобильный робот и целевая точка

Угол  $\alpha_P$  определяется как угол между продольной осью робота и осью  $X$  системы координат  $OXY$ . Система очувствления робота позволяет ему определять препятствия на своём пути. Бортовая система управления тактического уровня робота вычисляет расстояние до цели  $D$ , азимут цели  $\alpha_Ц$  и пеленг цели  $\alpha_П$  по формулам

$$\Delta x = x_Ц - x_P,$$

$$\Delta y = y_Ц - y_P,$$



$$D = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}.$$

$$\alpha_{Ц} = \arctg(\Delta x, \Delta y),$$

$$\alpha_{П} = \alpha_{Ц} - \alpha_{Р}.$$

Информация о расстоянии до цели  $D$  и пеленге цели  $\alpha_{П}$  передаётся в экспертную систему. Также на вход экспертной системы поступают данные о наличии опасности на том или ином направлении, формируемые специальным анализатором, получающим сведения от сканирующего локатора или анализирующего, например, локальную карту местности, имеющуюся в распоряжении робота.

Экспертная система формирует два сигнала. Первый из них представляет собой желаемую угловую скорость поворота робота  $\varphi_{Ж}$  относительно характерной точки на линии, соединяющей оси ведущих колёс и равноудалённой от обоих ведущих колёс робота. Второй сигнал передаёт информацию о желаемой скорости  $V_{Ж}$  продольного движения робота. На основании этих сигналов бортовая система управления вычисляет управляющие воздействия и подаёт их на приводы левого и правого колёс робота.

Для рассматриваемого здесь робота Pioneer 3-DX желаемые угловые скорости  $\Omega_{РЖ}$  и  $\Omega_{ЛЖ}$  вращения валов исполнительных двигателей, управляющих правым и левым колёсами соответственно, вычисляются по формулам

$$\Omega_{РЖ} = \frac{i}{2r}(V_{Ж}\sqrt{2} + l\varphi_{Ж}),$$

$$\Omega_{ЛЖ} = \frac{i}{2r}(V_{Ж}\sqrt{2} - l\varphi_{Ж}),$$

где  $r$  – радиус колеса;  $l$  – расстояние между ведущими колёсами робота;  $i$  – передаточное отношение редуктора.

Правила базы знаний экспертой системы могут иметь следующий вид.

ЕСЛИ (опасность слева И опасность справа) ТО  $V_{\text{Ж}} = 0$

ИНАЧЕ ЕСЛИ (опасность слева) ТО  $V_{\text{Ж}} = V_{\text{Ж.МАКС}}$

ИНАЧЕ ЕСЛИ (опасность справа) ТО  $V_{\text{Ж}} = -V_{\text{Ж.МАКС}}$

ИНАЧЕ

ЕСЛИ (Пеленг цели  $\alpha_{\text{П}} < -30$  градусов) ТО  $\varphi_{\text{Ж}} = -\varphi_{\text{Ж.МАКС}}$

ИНАЧЕ

ЕСЛИ (Пеленг цели  $\alpha_{\text{П}} < -10$  градусов) ТО  $\varphi_{\text{Ж}} = -0,5 \varphi_{\text{Ж.МАКС}}$

ИНАЧЕ

ЕСЛИ (Пеленг цели  $\alpha_{\text{П}} > 30$  градусов) ТО  $\varphi_{\text{Ж}} = \varphi_{\text{Ж.МАКС}}$

ИНАЧЕ

ЕСЛИ (Пеленг цели  $\alpha_{\text{П}} > 10$  градусов) ТО  $\varphi_{\text{Ж}} = 0,5 \varphi_{\text{Ж.МАКС}}$

ИНАЧЕ  $\varphi_{\text{Ж}} = 0$

ЕСЛИ (опасность прямо) ТО  $V_{\text{Ж}} = 0$  И  $\varphi_{\text{Ж}} = 0$

ИНАЧЕ ЕСЛИ (Дальность  $> 100$  метров)  $V_{\text{Ж}} = V_{\text{Ж.МАКС}}$

ИНАЧЕ ЕСЛИ (Дальность  $> 10$  метров)  $V_{\text{Ж}} = 0,3 V_{\text{Ж.МАКС}}$

ИНАЧЕ ЕСЛИ (Дальность  $> 2$  метров)  $V_{\text{Ж}} = 0,1 V_{\text{Ж.МАКС}}$

ИНАЧЕ  $V_{\text{Ж}} = 0$

Согласно правилам базы знаний робот будет стремиться отклониться от препятствий, расположенных от него слева или справа. Если препятствия не обнаружены, то робот будет двигаться по направлению к цели. Если движению робота к цели ничто не препятствует, то скорость продольного движения определяется в зависимости от расстояния до целевой точки. Угловая скорость поворота робота к цели зависит от пеленга цели. Если

препятствие находится прямо на пути движения робота к цели или дистанция достаточно мала, робот останавливается.

В частности, как показано в [42], экспертная система тактического уровня управления движением автономного мобильного робота может быть реализована в системе программирования Dyn-Soft RobSim 5.

Следует отметить, что сформированная экспертная система, несмотря на её простоту, в целом решает поставленную задачу управления движением мобильного робота в среде с препятствиями. Но рассмотренная в примере база знаний интеллектуальной системы является довольно примитивной. Например, такая экспертная система формирует лишь дискретное управление движением робота и имеются только две градации скорости изменения угла поворота и скорости продольного движения. Кроме того, не анализируется степень опасности различных возможных направлений движения робота. База знаний ЭС, которая будет обеспечивать более высокое качество управления, должна содержать значительно большее число продукционных правил, чем система, соответствующая рассмотренной выше программе. В частности, для достижения плавного управления движением требуется большее число правил, учитывающих различные комбинации значений дистанции до цели, пеленга цели и опасности направлений движения.

### **3.8 Совместное применение экспертных и нейросетевых технологий для построения адаптивных следящих приводов**

Следящие приводы, применяемые в робототехнике и мехатронике и построенные с применением классических П-, ПИ- и ПИД-регуляторов, имеющих после настройки неизменные зна-

чения своих параметров, могут не обладать достаточно высокими динамическими свойствами, если значения ряда параметров объекта управления и внешние воздействия изменяются в широких диапазонах. Улучшение свойств приводов возможно при использовании интеллектуального управления, на основе которого создаются контроллеры, обладающие желаемыми нелинейными характеристиками и обеспечивающие приводам свойство адаптивности.

Данные, приведённые в [14,15], позволяют утверждать, что применение интеллектуальных технологий при создании приводов в робототехнике и мехатронике позволяет, прежде всего, повысить точность, быстродействие и качество переходных процессов приводов.

Характерным примером эффективного использования технологии экспертных систем являются следящие приводы с *экспертными регуляторами* (ЭР). В основе такого регулятора лежит экспертная система, принимающая задающее воздействие и сигналы от датчиков привода и вырабатывающая управляющие воздействия на исполнительные его части. Как показано в [14, 15], базовая часть структуры интеллектуального привода с экспертным регулятором подобна классической структуре следящей системы. В ней используются контуры регулирования положения, скорости и тока, в которых могут использоваться П-, ПИ- и ПИД-регуляторы. Но есть и принципиальное отличие от обычного привода. Оно состоит в том, что структура и значения параметров регуляторов могут оперативно изменяться на основании данных, получаемых с применением интеллектуальных технологий.

При большом количестве правил в базе знаний ЭС построенный на её основе *экспертный регулятор* вынужден тратить много времени на обработку поступающей в него информации.

Основные затраты времени обусловлены работой с правилами, хранящимися в базе знаний, и выполнением идентификации параметров объекта управления. Поэтому ЭР, обладает недостаточным быстродействием и, как правило, не может справиться со всеми возложенными на него задачами, если речь идёт о работе в реальном времени. Особенно остро эта проблема стоит в быстродействующих приводах роботов и мехатронных систем, а также во всех системах управления быстропротекающими процессами. Поэтому в [14,15] отмечается, что построение средств регулирования приводов только на базе экспертных систем нецелесообразно. Привод с ЭР только на основе ЭС будет иметь недостаточно высокое быстродействие, а при использовании высокопроизводительных вычислительных устройств окажется существенно сложнее и дороже традиционного варианта привода.

По этой причине при создании высококачественных адаптивных приводов интерес представляет результат объединения двух технологий – экспертных систем и искусственных нейронных сетей. Первая технология обеспечивает интеллектуальный анализ сложившейся ситуации и принятие решений экспертной системой, а вторая – высокое быстродействие и надёжность при выработке управляющих воздействий. В результате такого объединения технологий удаётся создать *гибридный экспертно-нейросетевой регулятор*, который является основой построения интеллектуального адаптивного следящего привода.

Как и требует того основной принцип построения следящих систем, включённые последовательно гибридный экспертно-нейросетевой регулятор и объект управления охвачены отрицательной обратной связью. Анализируя структуру такого привода, описанного в [14], можно заметить, что на основании задающего воздействия  $g(t)$  и регулируемой переменной  $y(t)$  элемент сравнения формирует сигнал рассогласования  $e(t)$ , поступающий на

вход регулятора. На выходе регулятора образуется управляющее воздействие  $u(t)$ , передаваемое на объект управления. Казалось бы, отличий от традиционного следящего привода нет. Но это не так.

Повышение качества следящего привода с гибридным экспертно-нейросетевым регулятором обусловлено особенностью его структуры (рис. 3.11).

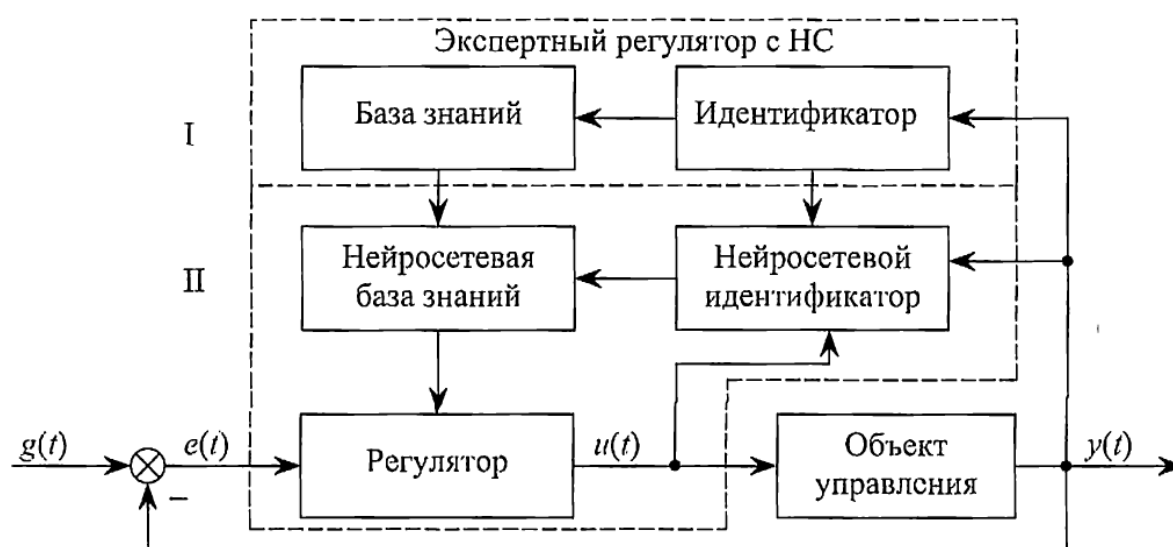


Рисунок 3.11 Следящий привод с гибридным экспертно-нейросетевым регулятором

Она состоит в том, что такой интеллектуальный регулятор имеет нижний и верхний уровни управления. На нижнем уровне располагается основной, например, ПИ- или ПИД-регулятор. В отличие от регулятора классического типа значения параметров этого основного регулятора могут изменяться оперативно в процессе работы следящей системы под действием команд, поступающих с верхнего уровня гибридного экспертно-нейросетевого регулятора.

Верхний, интеллектуальный уровень гибридного экспертно-нейросетевого регулятора также разделён на два уровня, отме-

ченных на рисунке 3.11 цифрами I и II. На самом высоком уровне I действует экспертная система. Её задача состоит в определении наиболее подходящей структуры модели объекта управления и в определении значений её параметров. Необходимость решения этой задачи вызвана тем, что выбор значений параметров основного регулятора и качество системы управления в целом существенно зависят от того, насколько точно известны структура математической модели и значения параметров объекта управления. Поэтому выбор адекватной математической модели объекта управления и идентификация его параметров представляют собой одну из важнейших задач, решаемых интеллектуальным регулятором. Её решение требует значительных затрат времени и выполняется в режиме offline с использованием идентификатора и базы знаний ЭС.

Уровень II гибридного экспертно-нейросетевого регулятора предназначен для оперативного интеллектуального синтеза основного регулятора и определения наилучших желаемых значений его параметров. Такая процедура также требует решения задачи идентификации и должна осуществляться в реальном времени. Поэтому на этом уровне целесообразно использовать технологии искусственных нейронных сетей. Необходимое высокое быстродействие обеспечивается, прежде всего, параллельной обработкой сигналов, присущей ИНС.

Для решения поставленной задачи используются нейросетевая база знаний и нейросетевой идентификатор. Таким образом, можно считать, что идентификатор гибридного экспертно-нейросетевого регулятора разделён на две части. Первая его часть реализуется с помощью ЭС и работает в режиме off-line. Вторая часть построена на ИНС и в реальном времени определяет требуемые изменения параметров основного регулятора.

База знаний, необходимая для функционирования интеллектуальной составляющей гибридного экспертно-нейросетевого регулятора также оказывается разделённой на две части. Её первая часть обеспечивает работы ЭС и содержит знания о целях функционирования привода, видах и диапазонах возможных изменений входных и возмущающих воздействий на систему, а также об имеющихся алгоритмах преобразования информации. Вторая часть этой базы построена на ИНС и содержит знания о функциональных особенностях объекта управления и регулятора.

Как и всякий интеллектуальный регулятор, гибридный экспертно-нейросетевой регулятор может работать в двух режимах: в режиме обучения и в режиме основного функционирования, т.е. управления в составе следящего привода. Состав решаемых при этом задач показан на рисунке 3.12 [14]. В режиме обучения регулятора производится накопление знаний о свойствах объекта управления и регулятора, а также формирование ИНС, решающей задачу идентификации.

В режиме основного функционирования ЭС и ИНС осуществляют идентификацию структуры и значений параметров модели ОУ и синтез основного регулятора. Получаемые таким образом результаты используются для подстройки параметров основного регулятора на ПИ- или ПИД-регуляторах.



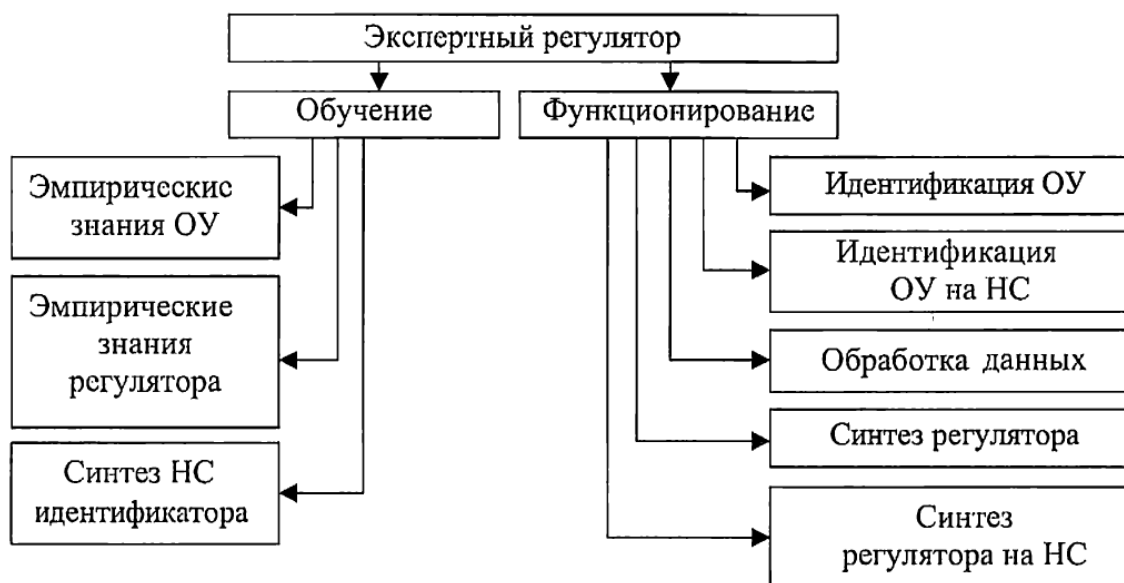


Рисунок 3.12 Состав задач, решаемых гибридным экспертно-нейросетевым регулятором в режимах обучения и основного функционирования

Описанное здесь построение интеллектуального регулятора позволяет повысить гибкость управления следящим приводом и расширить его адаптационные возможности. Во-первых, использование ЭС даёт возможность выбирать наиболее удачные алгоритмы управления и адаптации из числа нескольких алгоритмов, доступных для работы системы. Их обоснованный выбор осуществляется в результате обработки актуальной информации о системе, которая бывает неполной и противоречивой, с использованием имеющихся знаний. Во-вторых, гибкость управления обусловлена способностью ЭС и ИНС к обучению. Знания, которыми обладают ЭС и ИНС гибридного экспертно-нейросетевого регулятора, могут быть изменены и расширены. Это положительно влияет на адаптационные возможности следящего привода.