

УПРАВЛЕНИЕ МЕХАТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТИ

Интеллектуальные системы управления, выполненные по технологии экспертных систем, нечеткой логики или нейронных сетей, требуют выполнения большого объема вычислений. Вместе с тем, быстродействие бортовых контроллеров и управляющих ЭВМ ограничено. Поэтому в некоторых случаях применение таких интеллектуальных систем управления становится невозможным в результате того, что они оказываются неспособными работать в реальном времени.

Использование ассоциативной памяти в системах интеллектуального управления позволяет добиться значительно более высокого быстродействия. **Основная идея** заключается в следующем. При формировании управляющих воздействий контроллер обученной системы интеллектуального управления не производит вычислений, а извлекает из памяти уже записанные значения выходного сигнала, соответствующие состоянию входов системы управления. В этом случае быстродействие велико и определяется скоростью доступа контроллера к ячейке памяти.

В системах управления память используется для запоминания информации и восстановления её с заданной точностью. При этом под восстановлением искомой информации понимается получение выходного вектора при поступлении в память соответствующего входного вектора.

Особенность ассоциативной памяти состоит в том, что она позволяет восстанавливать информацию **на основе ассоциации**, т.е. по заданному сочетанию признаков, свойственных искомой информации.

Слово «ассоциация» происходит от латинского слова *associare*, которое означает соединять, объединять. Ассоциации характерны для человека и изучаются психологией и философией. Они являются своеобразными реакциями организма на раздражители, в качестве которых могут выступать сигналы органов чувств или мысли человека. Благодаря ассоциациям изменяется ход мыслей человека, и под действием одних мыслей он начинает думать о чём-то другом. Таким образом, ассоциация – это связь между внешними воздействиями или образами объектов и явлений и возникающими в сознании человека образами других объектов и явлений. Эта связь закреплена в памяти и заставляет человека, получившего некоторое воздействие от одного объекта, думать о другом объекте. Способность к

ассоциациям заложена и в техническое средство, называемое ассоциативной памятью.

Ассоциативная память может быть определена как система для записи, хранения, поиска, обработки и считывания данных об объекте, которые могут быть инициализированы (дополнены, восстановлены) по фрагменту этих данных, используемому в качестве поискового фрагмента (ключевого слова).

Ассоциативная память (АП) решает задачу соотнесения ключевого слова с хранимыми данными и выдачи полной информации об объекте, выполняя её восстановление на основании сведений, хранимых ассоциативной памяти.

С учётом характерной особенности ассоциативной памяти она имеет и другие названия. Иногда её называют памятью, адресуемой по содержимому, контентно-адресуемой памятью или ассоциативным запоминающим устройством.

Достоинства и недостатки технологии ассоциативной памяти, как компонентов систем интеллектуального управления

К достоинствам технологии ассоциативной памяти можно отнести:

- высокое быстродействие, которое зависит лишь от скорости доступа к ячейке памяти;
- высокий уровень надёжности хранения информации. Алгоритм работы системы управления защищён от вскрытия. Даже если получить доступ к данным, хранящимся в ассоциативной памяти, нельзя вскрыть знания, заложенные в интеллектуальную систему.
- возможность построения эффективных систем интеллектуального управления, функционирующих в условиях неопределённости.

Недостатки технологии ассоциативной памяти:

- большие требуемые объёмы памяти;
- невозможность объяснения результата;
- большие трудозатраты организации процесса оффлайн обучения и обеспечения оптимизации объема памяти.

Особенности и области рационального применения технологии ассоциативной памяти в составе систем интеллектуального управления.

Ассоциативную память, дающую высокое быстродействие системе управления даже в том случае, когда используются относительно медленные контроллеры, можно применять на всех уровнях интеллектуальных систем управления. Но есть некоторые особенности, которые следует учитывать.

Прежде всего, технология ассоциативной памяти удобна для реализации интеллектуальных регуляторов на нижнем (приводном) уровне системы управления. Именно на этом уровне требуется работа в реальном времени при наименьшем значении периода квантования сигналов по времени. Низкое быстродействие контроллеров компенсируется высокой скоростью принятия решения в технологии ассоциативной памяти без необходимости решения ресурсоёмких вычислительных задач.

Считается, что на тактическом уровне системы управления также можно использовать технологию ассоциативной памяти. Однако целесообразность её применения не всегда очевидна. АП эффективна в том случае, когда необходимо защитить алгоритмы и знания, заложенные в систему. Во остальных случаях удобнее реализовать иную интеллектуальную технологию, например, нечёткую логику или искусственные нейронные сети.

На стратегическом уровне системы управления также возможно использовать технологию ассоциативной памяти, но делать это целесообразно только в том случае, если стратегический уровень реализован как система без памяти.

Модель ассоциативной памяти

Простейшая модель АП состоит из ассоциативной логико-запоминающей среды, которая связана с двумя каналами ввода и одним каналом вывода информации. Логико-запоминающая среда является носителем информации. Наиболее распространённые устройства памяти построены на полупроводниковых элементах.

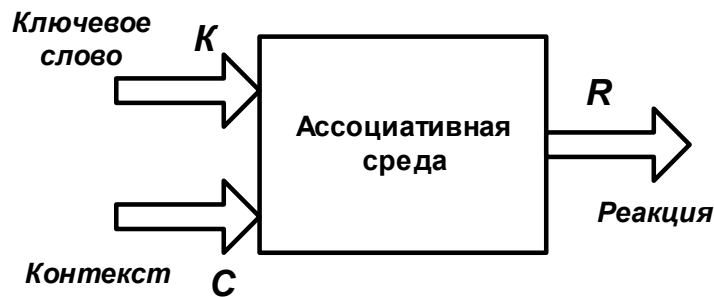


Рис. 1. Модель ассоциативной памяти

Один вход (K) предназначен для подачи ключевого слова. При записи на него подаётся входная информация. На второй вход (вход C) поступает признаковая информация, представляющая собой контекст, в котором входная информация записывается в память. В данном случае контекст – это некоторые сопутствующие обстоятельства.

При ассоциативной выборке по ключу (или его фрагменту) на входе K формируется ответная реакция R на выходе памяти. Эта реакция зависит от ключевого слова на входе K . Важно отметить, что для выбора записанной в память информации может быть использован любой её фрагмент в качестве исходного. Подлежащую выборке информацию можно конкретизировать точнее путём задания различного контекста C .

Наиболее простой вариант АП называется «*память – каталог*» (рис.2).

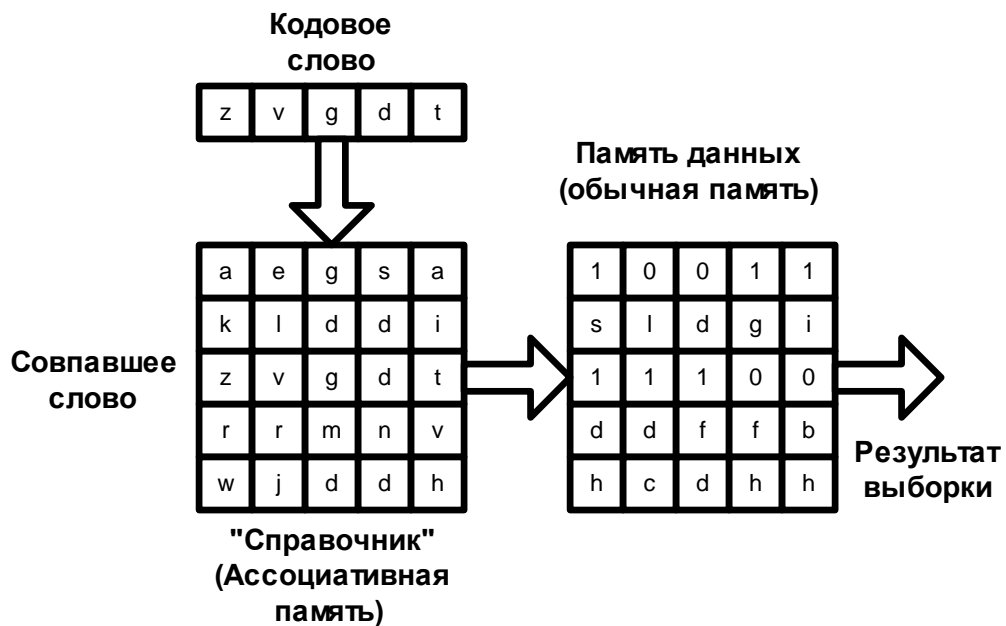


Рис. 2. Структура ассоциативной памяти типа «*память – каталог*»

Она состоит из двух взаимосвязанных частей. Одна из них обозначается как «каталог» или «справочник». Вторая часть представляет собой обычную память данных произвольного доступа с линейной выборкой.

Поданная на вход справочника ключевая информация (ключевое слово) сравнивается одновременно со всеми словами, записанными в ячейках справочника. Каждая ячейка справочника представляет собой регистр для хранения одного слова. Он дополнен комбинационными схемами для сравнения содержимого регистра с ключевым словом. В каждой ячейке справочника имеется выходная линия, которая возбуждается при совпадении её содержимого с ключевым словом и активизирует подключённую к ней ячейку памяти данных. Фактически выходные шины справочника играют роль адресных линий памяти данных. Ячейка справочника, содержимое которой совпало с ключевым словом, указывает на соответствующую ячейку памяти данных, содержимое которой выводится как реакция АП.

Важная особенность ассоциативной памяти состоит в её способности **восстанавливать информацию по её фрагментам**. Под процессом восстановления искомой информации будем понимать получение выходного вектора при поступлении на вход памяти соответствующего входного вектора (ключевого слова).

Такая способность АП оказывается чрезвычайно важной при создании систем управления объектами, функционирующими в условиях **неопределённости**, когда системе доступна не вся информация, необходимая для однозначного принятия решений.

По способу хранения и поиска информации память подразделяется на два типа: **переборную** и **ассоциативную**.

Переборной памятью называют память, в которой осуществляется поиск заданной информации путем последовательного перебора элементов памяти и сравнения их содержимого с входным вектором. В случае полного совпадения входного вектора с одним из векторов, хранящихся в памяти, она вырабатывает выходной вектор, соответствующий искомому вектору. Переборная память называется неупорядоченной, если информация в ней хранится в произвольном порядке, и упорядоченной, если содержимое элементов памяти упорядочено по какому-либо признаку, что приводит к повышению скорости работы переборной памяти. Примерами переборной памяти могут служить память электронных вычислительных машин, записи на магнитных лентах и т. п.

АП может быть пирамидальной, матричной и самоорганизующейся. Пирамидальная (иерархическая) АП проводит классификацию входного вектора по некоторому признаку, относит его к одной из классификационных групп, затем в каждой группе вектор классифицируется по другому признаку, и этот процесс повторяется до полного совпадения всех признаков с одной из классификационных групп.

Например, геометрические фигуры можно классифицировать сначала по форме (на прямоугольники, треугольники, квадраты и т. д.), затем по цвету в каждой группе, потом по площади фигур и т. д. (рис. 3).

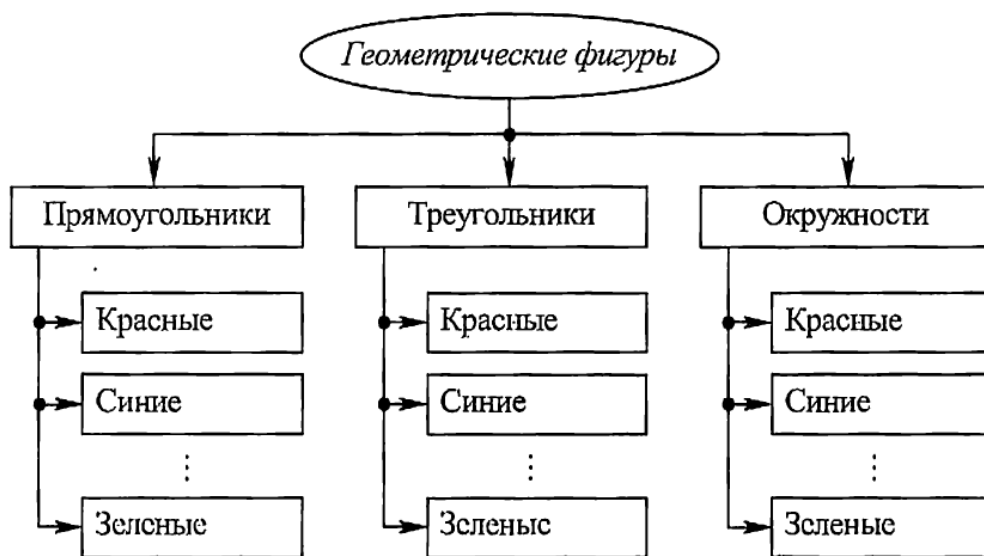


Рис 3. Пример классификации в пирамидальной памяти

Матричная АП — это частный случай пирамидальной АП, когда имеется только один уровень классификации. Матричную АП можно реализовать несколькими способами:

- программно на ЭВМ;
- на логических элементах (при этом алгоритмы работы памяти подчиняются булевой алгебре);
- на однослойных нейросетях (персептронах);
- на нейросетях Хопфилда;
- в виде матричного дешифратора на диодах.

При программной реализации АП (рис.4) сначала элементы входного вектора \mathbf{X} квантуются по уровню. Затем из многомерного массива \mathbf{z} по полученным значениям выбирается выходной вектор \mathbf{Y} .

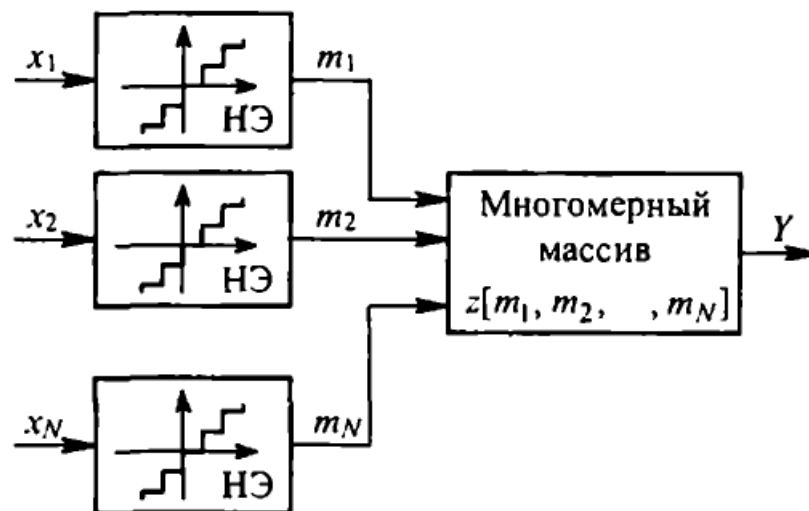


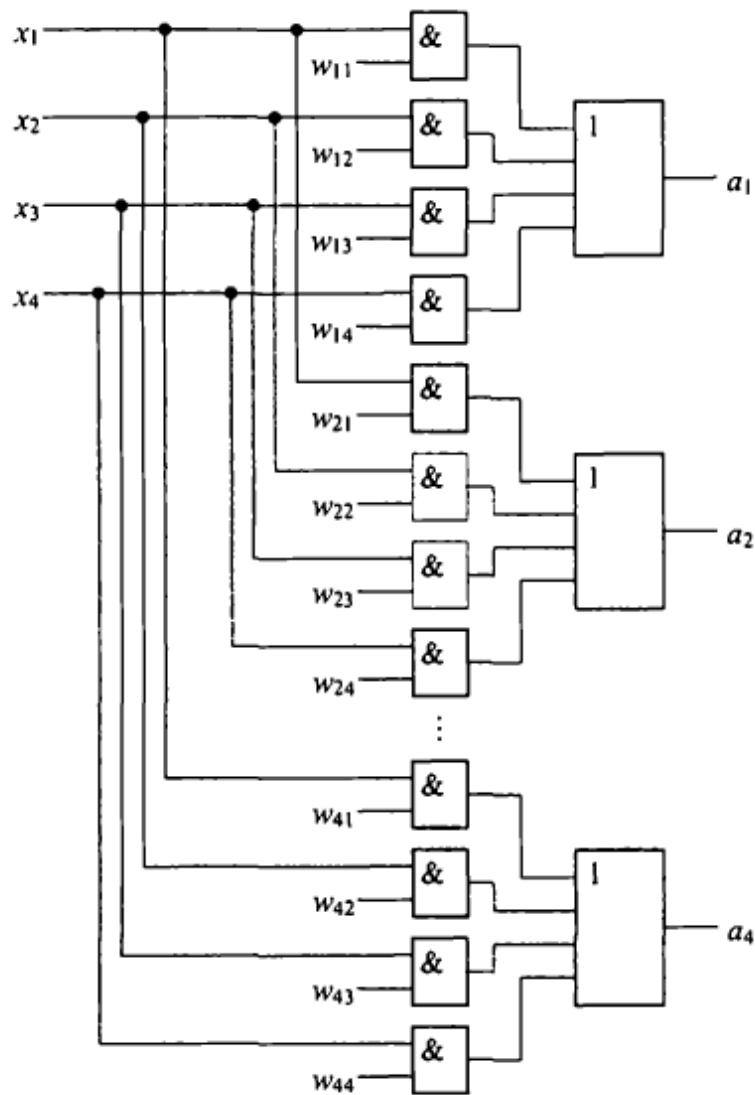
Рис 4. Пример реализации матричной ассоциативной памяти на ЭВМ

С точки зрения программирования реализация АП достаточно проста. Основная проблема связана с формированием знаний, содержание которых должно, с одной стороны, соответствовать по возможности наименьшему объему занимаемой памяти, а с другой стороны – обеспечивать заданные показатели качества управления.

Построение интеллектуальных систем управления с АП на традиционных вычислительных средствах последовательного действия в настоящее время является наиболее приемлемым как с точки зрения быстродействия, так и цены, поскольку не требует аппаратной модернизации и связано только с программной реализацией новых алгоритмов управления.

Использование логических элементов для построения обучаемой АП, особенно в условиях, когда имеется широкий спектр программируемых логических матриц (ПЛИС), обеспечивающих высокую степень интеграции логических элементов и простоту их коммутации, является весьма перспективным направлением в развитии интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами.

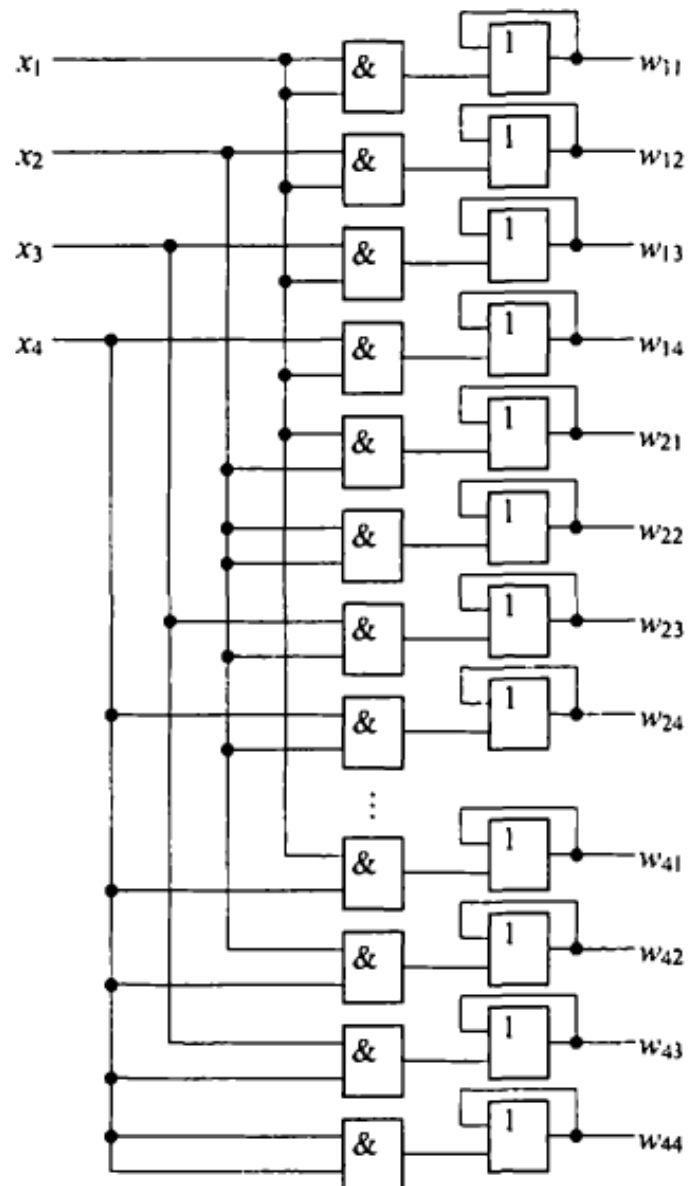
Пример функциональной схемы АП на логических элементах представлен на рис.



Устройство АП работает следующим образом. На входы логических элементов И поступают сигналы, представляющие собой компоненты входного вектора $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$, и сигналы, соответствующие компонентам w_{11}, \dots, w_{44} матрицы ассоциаций W . Компоненты этой матрицы формируются путём обучения АП.

В результате преобразования сигналов в элементах И, а затем в элементах ИЛИ образуется искомый полный вектор $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$.

При обучении АП формирование элементов матрицы ассоциаций W осуществляется путём логического умножения «правильного» входного вектора X на себя. Для дальнейшего использования матрицы ассоциаций значения её компонентов запоминаются на элементах типа "защелки". Они могут быть реализованы, например, с помощью логических элементов ИЛИ с обратной связью (рис.).



Необходимо отметить особенность такой АП на логических элементах, которая состоит в невозможности выполнения операции «исключающее ИЛИ». Поэтому, если во входном векторе будет присутствовать элемент, общий для двух обучающих векторов, то на выходе будет сформирован вектор, у которого будут элементы обоих обучающих векторов.

УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТИ

Технология ассоциативной памяти позволяет на основе ассоциативных связей проводить классификацию состояния системы на качественном уровне и формировать управления, соответствующие текущему состоянию системы и заданному критерию качества управления.

Главное преимущество АП, важное для создания эффективных систем интеллектуального управления, — простота как программной, так и аппаратной реализации, которая обеспечивает высокое быстродействие, определяемое временем обращения к отдельной ячейке памяти.

Было отмечено, что использование технологии ассоциативной памяти позволяет построить все уровни иерархии интеллектуального управления. Чаще всего АП является дополнением (интеллектуальной надстройкой) к другим видам интеллектуального управления.

При разработке технологии экспертных систем используется принцип, согласно которому интеллектуальная надстройка устанавливалась над типовым регулятором, а в случае применения технологии нейронных сетей нейросетевой регулятор устанавливался непосредственно в контур системы. В случае применения ассоциативной памяти возможны оба этих подхода. Однако возникает вопрос обоснованного определения области применения каждого из них в зависимости от действующих факторов и характера проявления неопределенностей.

При создании на базе ассоциативной памяти исполнительного и тактического уровней управления возникает проблема перераспределения между ними интеллектуальных функций, при котором минимум аппаратно-программной реализации обеспечивает заданное качество функционирования.

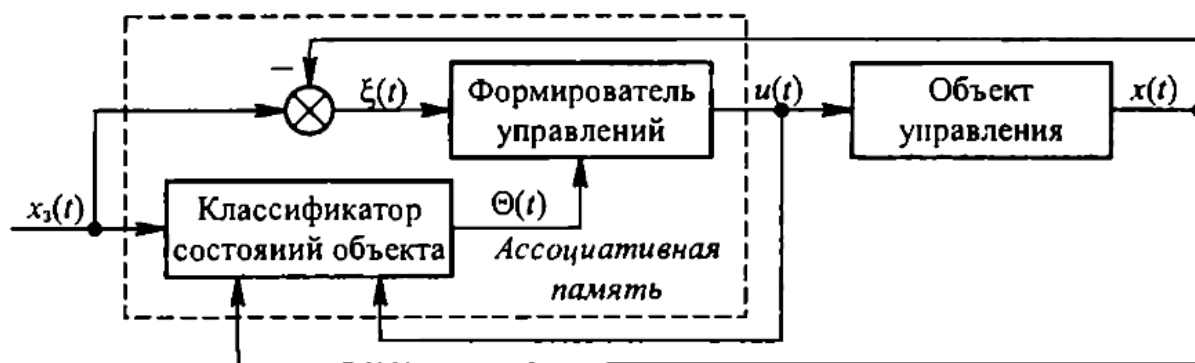
Опыт создания быстродействующих нейросетевых регуляторов исполнительного уровня, обеспечивающих инвариантность к определенному рода внешним возмущениям, наводит на мысль о целесообразности создания подобных регуляторов на базе ассоциативной памяти. При этом, используя аппроксимацию сложных траекторий движения объекта набором простых типовых движений, можно обеспечить развязку приводов для сложных многосвязных объектов.

Весьма перспективным представляется создание на базе ассоциативной памяти адаптивных регуляторов и адаптивных систем автоматического управления.

В отличие от традиционных систем адаптивного управления, построенных, как правило, на основе использования достаточно сложных алгоритмов, применение ассоциативной памяти может обеспечить их компактную реализацию и тем самым организовать адаптивное управление в реальном масштабе времени.

Один из путей построения систем адаптивного управления, функционирующих в реальном времени, основан на применении ассоциативной памяти. В этом случае адаптивное управление реализуется на базе знаний о связях законов управления, обеспечивающих заданное его качество, с переменными, характеризующими состояние системы. Извлекаемые из АП данные используются для изменения значений параметров регуляторов, причём они изменяются дискретно. При этом дискретность определяется требуемой точностью обеспечения качества управления. Поэтому задача адаптивного управления сводится к формированию конечного множества классов состояния системы и управляющих воздействий, соответствующих каждому классу состояний.

Возможная функциональная схема адаптивной системы представлена на рис.



АП используется для реализации двух функциональных элементов: классификатора состояний объекта управления и регулятора (формирователя управляющего воздействия на объект управления). В данном случае управляющее воздействие $u(t)$, сформированное регулятором, приложено непосредственно к объекту управления.

На основании информации, содержащейся в задающем $x_3(t)$ и управляющем $u(t)$ воздействиях и векторе $x(t)$ выходных сигналов объекта управления, классификатором производится классификация состояния объекта управления и формирование на этой основе вектора $\theta(t)$ настраиваемых параметров регулятора. Регулятор (формирователь управлений) выдаёт на объект управления воздействие $u(t)$, соответствующее рассогласованию между задающим воздействием $x_3(t)$ и сигналом $x(t)$ отрицательной обратной связи.

Приведённая выше функциональная схема адаптивной системы является обобщённой. Более конкретная функциональная схема приведена на следующем рисунке. Она соответствует подсистеме регулирования скорости следящего привода. Адаптация необходима, если момент инерции подвижных частей, приведённый к валу исполнительного двигателя, может изменяться в широком диапазоне. В этом случае ПИ-регулятор с постоянными параметрами не может обеспечить высокое качество регулирования скорости. Действительно, при уменьшении момента инерции возрастает коэффициент усиления разомкнутой подсистемы, снижаются запасы устойчивости, появляются высокочастотные колебания и подсистема может потерять устойчивость. При увеличении момента инерции коэффициент усиления разомкнутой подсистемы снижается, что также ведёт к уменьшению запасов устойчивости и появлению низкочастотных слабозатухающих колебаний.

В рассматриваемой адаптивной подсистеме классификация состояния объекта управления осуществляется с помощью идентификатора структуры и параметров объекта, а формирование управлений выполняется регулятором с переменными (настраиваемыми) параметрами. Регулятор имеет в своём составе компонент с передаточной функцией W_{PI} . Все эти элементы реализованы в ассоциативной памяти.

Сигнал $\omega(t)$, несущий информацию о фактической скорости вращения вала, и управляющее воздействие $\omega_3(t)$ подаются на идентификатор. Он определяет принадлежность желаемых значений параметров регулятора к одному из заранее выбранных множеств T .

Из ассоциативной памяти выбирается соответствующее этому множеству заранее сформированное управление. Нелинейные элементы НЭ₁ и НЭ₂ отражают дискретность изменений параметров регулятора, обусловленную особенностями работы ассоциативной памяти.

в рамках определенного набора технологических движений, характерных для сборочного роботизированного процесса, неопределенность может быть классифицирована как предсказуемая. Роботы, предназначенные для экстремальных сред, в основном работают в условиях непредсказуемой неопределенности, так как траекторию их движения нельзя заранее предсказать.

Такой подход позволил выделить два класса интеллектуальных систем управления, принципиально отличающихся по архитектуре, принципу действия и области применения.

Интеллектуальные системы управления I рода предназначены для работы в условиях предсказуемой неопределенности, в основном связанной с взаимным влиянием отдельных степеней подвижности сложного многозвенного объекта управления друг на друга.

Интеллектуальные системы управления II рода ориентированы на работу в условиях непредсказуемой неопределенности и функционируют на основе реализации своих адаптивных свойств за счёт использования технологии ассоциативной памяти.

Проведя классификацию и выявив источники неопределенности при управлении динамической системой, рассмотрим принципы построения и особенности функционирования систем управления, в которых задача устранения влияния неопределенности решается с помощью ассоциативной памяти.

Применение АП даёт следующее. При управлении сложными динамическими объектами в условиях неопределенности для реализации управления требуется проводить большой объем вычислений, но проводить их в реальном времени в процессе управления не обязательно. Вычисления можно выполнить заранее и записать в память — извлечение из памяти готового результата осуществляется значительно быстрее, чем его вычисление. Однако поместить в память все возможные решения практически невозможно из-за большого объема требуемой памяти. Кроме того, поиск решений будет очень долгим.

Ассоциативная же память запоминает связанные между собой данные и выбирает не точное значение, а наиболее к нему близкое. Например, в АП могут быть запомнены точки n -мерного пространства. Тогда по некоторым координатам из памяти можно извлечь точку, лежащую наиболее близко к заданной.

С одной стороны (поскольку в памяти записаны не все данные, а только некоторые, характеризующие определенные множества близких значений), применение АП позволяет существенно ограничить ее объем и значительно повысить быстродействие поиска нужной информации. С другой стороны (так как в таких системах управления из памяти выбираются структура и параметры регуляторов или управляющие воздействия), возникает сложная проблема определения размеров множеств значений параметров, которые в силу их дискретного представления в памяти не приводят к нарушению устойчивости и ухудшению качества управления.

В системах управления для обеспечения связанности информации АП обучается на входной вектор, состоящий из двух частей. Первая часть содержит информацию с выходов регулятора и датчиков обратных связей, а вторая — параметры регулятора или величины управляющих воздействий, обеспечивающих требуемые критерии качества.

В режиме управления по первой части вектора восстанавливается вторая. Таким образом осуществляется оперативная идентификация, которая позволяет снять проблему неполной информации за счет отнесения состояния системы к одному из заранее известных классов, для которых в памяти заложены решения в виде структур и параметров регуляторов или непосредственно в виде управляющих воздействий.

Для того чтобы ассоциативная память работала эффективно, необходимо осуществлять преобразование и сжатие входной и выходной информации. Эти функции выполняют рецепторная и эффекторная системы.

Известны два принципиальных подхода к построению систем управления с АП I и II рода. Первый подход иллюстрируется рис. 1, на котором представлена функциональная схема системы управления, состоящая из традиционного контура управления объектом и контура подстройки регулятора.

В контур подстройки регулятора входят:

- рецепторная система, которая осуществляет нормировку, сжатие и первичный анализ входной информации;
- ассоциативная память, классифицирующая состояние системы;
- эффекторная система, декодирующая информацию с выхода ассоциативной памяти и управляющая параметрами регулятора;
- блок оценки качества.

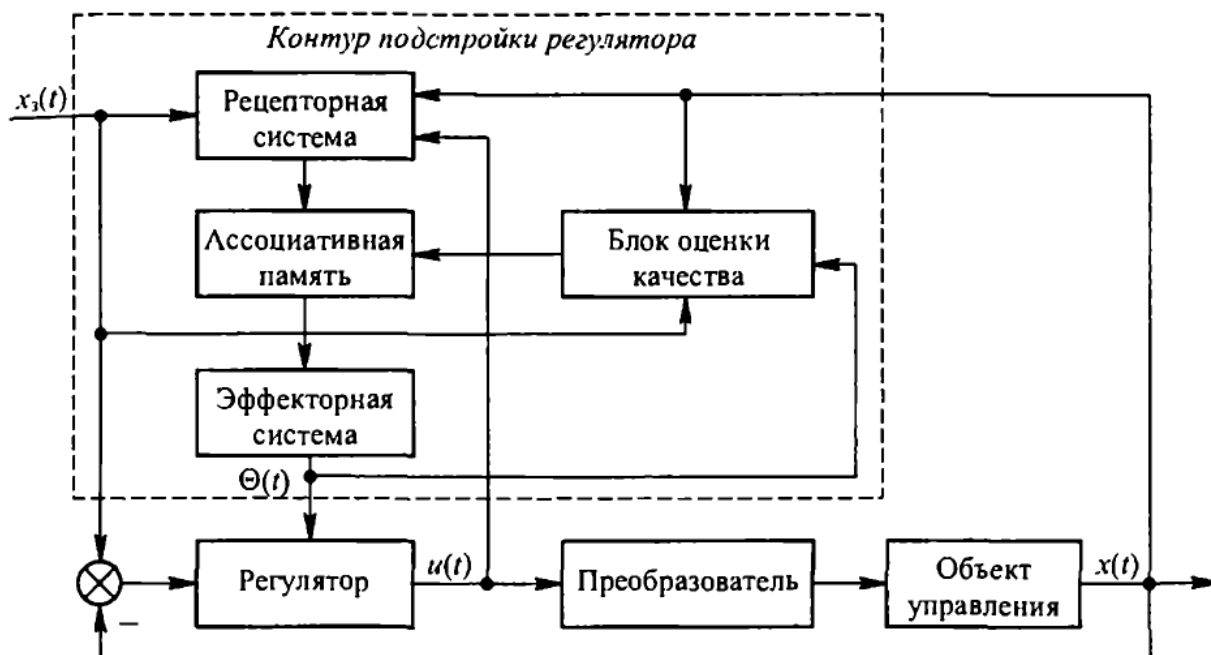


Рис. 1. функциональная схема системы управления с контуром подстройки регулятора на базе ассоциативной памяти

На вход рецепторной системы поступает вектор состояния объекта, содержащий информацию, соответствующую сигналу обратной связи, входному задающему воздействию и выходному сигналу регулятора.

На выходе эффекторной системы формируется вектор, содержащий параметры регулятора.

Учет внешних неизмеряемых возмущений происходит на этапе их оперативной идентификации АП, которая расценивает возмущения как изменение динамических характеристик объекта управления. Наличие блока оценки качества управления позволяет реализовать самообучение АП. Кроме того, он формирует сигнал разрешения записи в АП.

На этапе обучения блоку АП в качестве входного вектора предъявляется набор областей параметров объекта и соответствующие этим областям настройки регулятора, при которых удовлетворяется выбранный критерий качества. В процессе управления АП классифицирует входные векторы и формирует соответствующие параметры регулятора.

В качестве примера реализации такого подхода рассмотрим привод с двигателем постоянного тока, в котором с помощью АП подстраиваются параметры регулятора. Неопределенность обусловлена изменением момента

инерции подвижных частей (суммы моментов инерции объекта управления и ротора двигателя).

Эффективность работы регулятора с АП будем оценивать по сравнению с традиционным ПИД-регулятором, а сравнение будем проводить по качеству управления при изменении параметров объекта управления как в режиме переходного процесса, так и в режиме слежения при изменении момента инерции на валу электродвигателя.

Структурная схема системы управления замкнутого по скорости электропривода, в котором подстройка регулятора осуществляется на базе АП, представлена на рис. 2. Блок оценки качества, рецепторная и эффекторная системы включены в состав АП.

Управление осуществляется регулятором, подстройка параметров которого осуществляется АП по методу обратных задач динамики. В контуре подстройки регулятора выполняется идентификация электромеханической постоянной времени электродвигателя T_M .

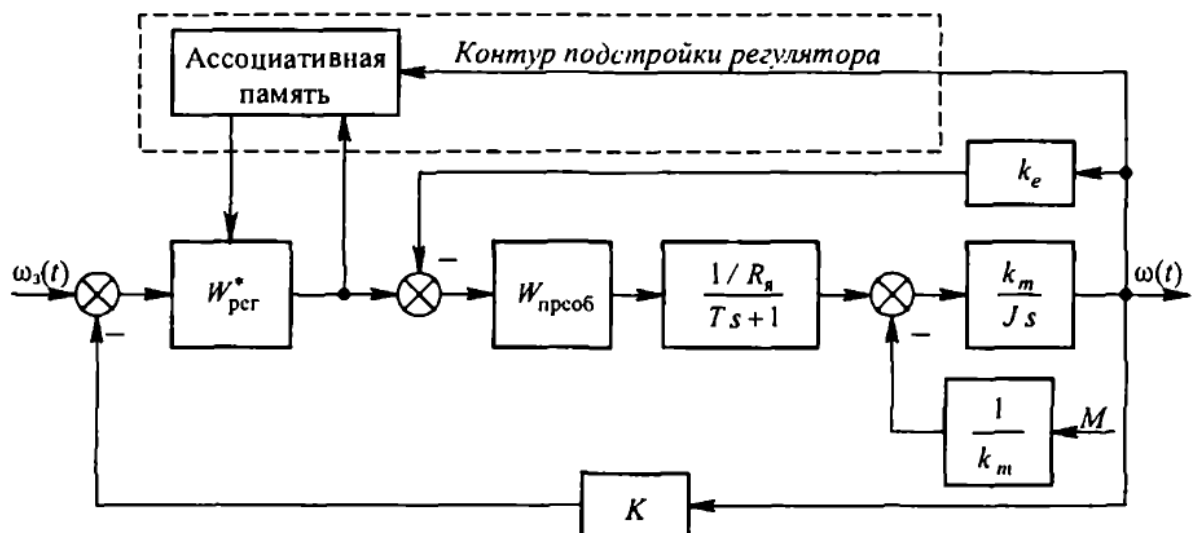


Рис. 2. Структурная схема системы управления электропривода с контуром подстройки регулятора на базе ассоциативной памяти

Второй подход к построению систем управления иллюстрируется рис.5. Здесь ассоциативная память, рецепторная и эффекторная системы помещаются непосредственно в контур управления и образуют регулятор.

На вход рецепторной системы поступают сигналы от блока оценки качества и вектор ошибки рассогласования между входным воздействием и

сигналом обратной связи $x(t)$. Вектор ошибки поступает также и на вход блока оценки качества.



Рис. 5. Система управления с регулятором на базе ассоциативной памяти

В такой системе формирование знаний в ассоциативной памяти на этапе обучения осуществляется оператором. АП записывает набор входных векторов сигналов от датчиков и соответствующих им управляющих воздействий, выполненных оператором. После обучения АП на всевозможные ситуации она заменяет человека. По входному вектору, содержащему информацию о состоянии объекта и входного воздействия, АП формирует управляющее воздействие на объект. Задача качественного управления сводится к обучению на наиболее полный набор возможных состояний объекта управления. Выполнение критерия качества является разрешением для записи информации в АП при обучении.

Описанные системы управления с АП имеют следующие преимущества:

- управление может осуществляться в одном контуре сразу по нескольким параметрам;
- одна АП может работать одновременно с несколькими контурами управления, в том числе и на разных уровнях управления (например, в работе АП может управлять сразу несколькими приводами благодаря многомерности ее входного и выходного сигналов).

Системы управления с подстройкой регулятора более эффективно работают в условиях предсказуемой неопределенности (ИСУ 1 рода), когда при известных типах движения динамической системы можно заранее определить структуру регулятора, наиболее полно удовлетворяющую всем

возможным движениям, а при управлении проводить только параметрическую настройку.

Схема с регулятором на основе АП лучше подходит для управления в условиях непредсказуемой неопределенности (ИСУ II рода), так как в ней непосредственно осуществляется формирование управляющих воздействий, обеспечивающее адаптивную подстройку под изменение как структуры, так и параметров объекта.