Высшее образование

М.М. Савин, В.С. Елсуков, О.Н. Пятина

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие

Под редакцией доктора технических наук, профессора В.И. Лачина

Рекомендовано
УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 550200, 651900 – «Автоматизация и управление»

Ростов-на-Дону
Феникс
2007

Глава 9

ЭЛЕМЕНТЫ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

9.1. Основные проблемы современной теории автоматического управления

В классической теории автоматического управления (ТАУ) задачи оптимизации и адаптации ставились в основном применительно к управлению «в малом». Это означает, что оптимальная программа изменения режимов технологического процесса, выраженная в задающих воздействиях регуляторов, считалась известной, определенной на стадии проектирования. Задача управления заключалась в выполнении этой программы, стабилизации программного движения. При этом допускались лишь малые отклонения от заданного движения, и переходные процессы «в малом» оптимизировались по тем или иным критериям.

В конце 50-х – начале 60-х гг. XX столетия появились работы Л.С. Понтрягина (принцип максимума), Р. Беллмана (динамическое программирование), Р. Калмана (оптимальная фильтрация, управляемость и наблюдаемость), которые заложили основы современной теории автоматического управления, общепринятого определения понятия которой пока не существует. Некоторым характерным признаком современной теории автоматического управления считают также описание процессов в пространстве состояний, развитие теории адаптивного управления, т. е. управления при неполной априорной информации.

Наиболее точно современную теорию автоматического управления можно отделить от классической ТАУ, учитывая требования научно-технического прогресса, современной и перспективной автоматизации. Важнейшим из таких требований является оптимальное использование всех располагаемых ресурсов (энергетических, информационных, вычислительных) для достижения главной обобщенной конечной цели при соблюдении ограничений. Например, запуск или выход на новый режим работы машины, агрегата, станции с минимальными затратами, достижение заданной в 3-мерном пространстве навигационной точки в заданное время с заданным курсом при минимальном расходе топлива. В связи с этим оптимизация «в большом», осуществляемая в реальном времени в процессе управления, становится центральной проблемой современной теории автоматического управления. Эта фундаментальная проблема порождает ряд крупных проблем, задач и методов их решения. Прежде всего указанная оптимизация требует полного использования имеющейся априорной информации в виде математической модели управляемого процесса или объекта. Использование таких моделей не только на стадии проектирования, но и в процессе функционирования систем, является одной из характерных черт современной теории автоматического управления.

Оптимальное управление возможно лишь при оптимальной обработке информации. Поэтому теория оптимального (и субоптимального) оценивания (фильтрации) динамических процессов является составной частью современной теории автоматического управления. Особо важной является параметрическая идентификация (оценивание параметров и характеристик по экспериментальным данным), выполняемая в реальном масштабе времени в эксплуатационных режимах ОУ.

Центральной частью современной теории автоматического управления является, собственно, теория оптимального или субоптимального управления «в большом» детерминированными или стохастическими нелинейными процессами. Подлинная оптимизация автоматического управления в условиях неполной априорной информации возможна только в процессе функционирования системы в текущей обстановке и возникшей ситуации. Следовательно, современная теория автоматического управления должна рассматривать адаптивное оптимальное (субоптимальное) управление «в большом». Кроме того, современная теория автоматического управления должна рассматривать методы резервирования и структурного обеспечения надежности (особенно принципы автоматической реконфигурации системы при отказах).

9.2. Адаптивная оптимальная САУ на базе самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией

Функциональная схема такой САУ (рис. 9.1) содержит следующие элементы:

1) блок памяти;
2) блок оценивания;
3,7) исполнительные блоки;
4) экстраполятор нулевого порядка (ЦАП);
5) обобщенный объект регулирования (ОР);
6) блок автоматического поиска порядка математической модели (ММ) объекта.

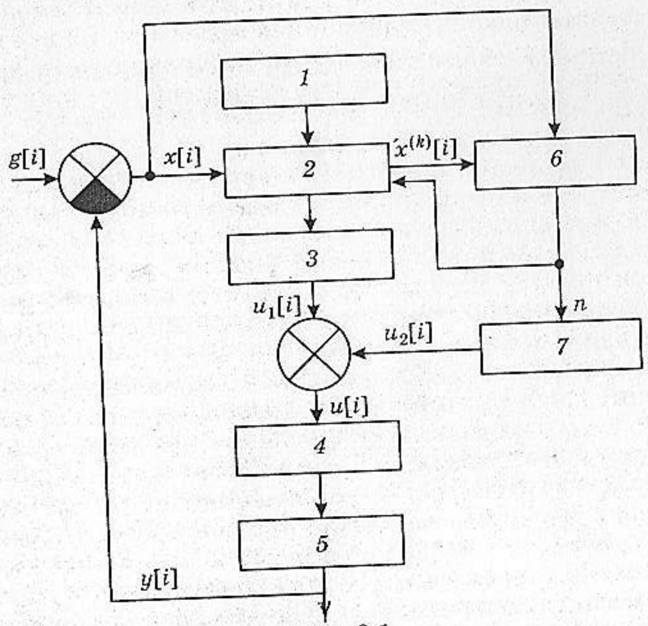

Рис. 9.1

По принципу функционирования эта САУ относится к системам с дискретным временем циклического типа. Входной величиной самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией служит сигнал рассогласования $x(t)$ между задающим воздействием $g(t)$ и выходной величиной $y(t)$ объекта. Этот сигнал измеряется на каждом шаге, т. е. при $t = iT$, $i = 0, 1, 2\ldots$.

В оперативной памяти *1* в табличном виде хранятся параметры, определенные на стадии проектирования: значения элементов матриц наблюдателей объекта с полиномиальной математической моделью различного порядка, оптимальные значения априорного времени экстраполяции и др.

В блоке оценивания *2* реализованы параллельно работающие рекуррентные циклические наблюдатели всех выбранных порядков $n = 2, 3, \ldots, n_m$. Полиномиальная математическая модель обобщенного регулируемого объекта эквивалентна цепочке последовательно соединенных интегрирующих звеньев, и блок *2* вырабатывает оценки векторов состояния этих цепочек для всех значений n. Соответственно каждый рекуррентный циклический наблюдатель строится по каскадной схеме, т. е. состоит из цепочки последовательно соединенных наблюдателей H_i $(i = 1, \ldots, n)$ производных (рис. 9.2, *а*), причем последние реализованы на базе фильтра Калмана–Бьюси второго порядка (рис. 9.2, *б*), у которого

$$\Phi_1(s) = \frac{\hat{x}}{x} = \frac{k_1 + k_2 s}{s^2 + k_2 s + k_1}, \quad \Phi_2(s) = \frac{\hat{\dot{x}}}{x} = \frac{k_1 s}{s^2 + k_2 s + k_1}.$$

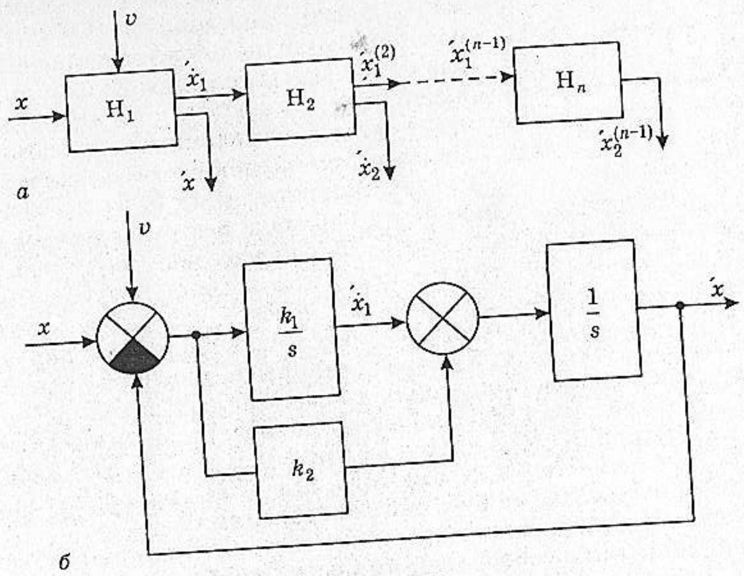

Рис. 9.2

Помеха $v(t)$ типа «белый шум» подавляется благодаря инерционности фильтра Калмана–Бьюси: первые оценки производных $\hat{x}_1^{(k)}$ содержат «шум», а их вторые оценки $\hat{x}_2^{(k)}$ – сглаженные, практически без «шума». Оценивание каждой последующей производной начинается после того, как завершится оценивание предыдущей (рекуррентный алгоритм). Так, например, после того, как $\hat{x} \approx x$ и соответственно $\hat{x}_1 \approx \dot{x}$, начинается оценивание $\hat{x}_1^{(2)}$ и завершается при $\hat{x}_2 \approx \hat{x}_1$, в результате чего получается $\hat{x}_1^{(2)} \approx \ddot{x}$ и т. д.

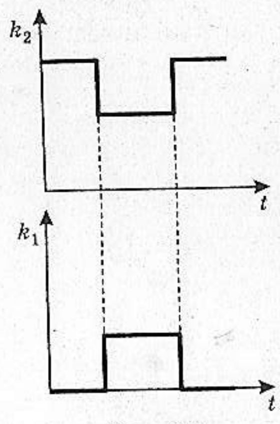

Рис. 9.3

Для каждого фильтра Калмана–Бьюси коэффициенты k_1 и k_2 меняются во времени в соответствии с передаточной функцией так, чтобы на начальном этапе происходило оценивание наблюдаемой (входной) величины, а затем – оценивание ее первой производной по времени (рис. 9.3).

В блок *6* посылаются оценки $\hat{x}, \hat{x}_2, \ldots, \hat{x}_2^{(n-1)}$ для всех n, измеренные практически в один и тот же момент времени t благодаря малой затрате времени на оценивание (на порядок меньше периода наиболее высокочастотной составляющей движения объекта регулирования) и значительной инерционности объекта. По векторам оценок в этом блоке выполняется экстраполяция (т. е. предсказание, прогнозирование изменения) сигнала рассогласования $x_э(\tau)$ на скользящий интервал $t \le \tau \le t + T_э$ для всех значений n, где $T_э$ – время экстраполяции. Кроме того, в этот же блок поступают значения рассогласования $x(\tau)$ и запоминаются на том же скользящем интервале. Далее осуществляется целочисленный поиск по n минимума усредненной нормы (например, квадрата) разности между фактическим и априорно предсказанным значением сигнала рассогласования. Это значение n считается оптимальным и по цепи местной ОС посылается в блок *2*, а затем из этого блока в исполнительный блок *3*. Кроме того, при этом происходит апостериорная оптимизация времени экстраполяции.

В исполнительном блоке *3* рассчитывается оптимальное управление u_1 объектом на основе минимизации функционала обобщенной работы. В блоке *7* определяется дополнительное управление u_2, компенсирующее неопределенности объекта. Управляющее воздействие $u = u_1 + u_2$ после экстраполятора нулевого порядка имеет вид кусочно-постоянной функции на интервалах $iT \le t \le (i+1)T$, определяемой через рассогласование и оценки его производных. При этом могут быть реализованы астатизмы высокого порядка ($v \ge 8$), которые считались недостижимыми в эпоху аналоговой техники. Обобщенный объект *5* кроме ОР включает в себя усилители, приводы, измерительные преобразователи. На рис. 9.4 дана иллюстрация работы САУ и самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией для ОР второго порядка.

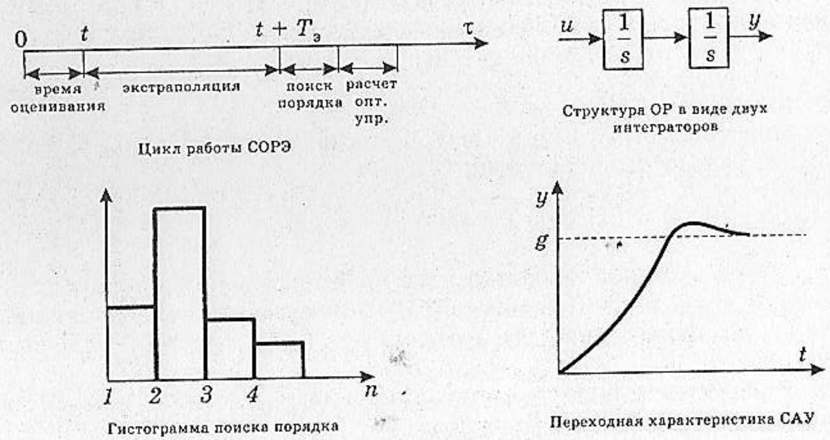

Рис. 9.4

Итак, данная САУ впервые позволяет реализовать адаптивное управление при неизвестной априори структуре ОР благодаря высокому уровню структурной и параметрической адаптации, которая обеспечивается прежде всего за счет применения наблюдателей в виде фильтра Калмана–Бьюси, устройств экстраполяции и поиска порядка математической модели.

Как было указано, в этой САУ для оптимизации используется функционал обобщенной работы – неклассический функционал с аддитивными затратами как на синтезируемое управление u, так и управление u^0 в оптимальной системе:

$$J = S(x(t_2)) + \int_{t_1}^{t_2} Q[x(t), t]\, dt + \int_{t_1}^{t_2} U[u(t), t]\, dt + \int_{t_1}^{t_2} U^*[u^0(t), t]\, dt .$$

ОУ задан уравнениями с линейно входящими управлениями:

$$\dot{x} = f(x, t) + \varphi(x, t)u \ , \ t \in [t_1, t_2].$$

При аналитическом конструировании необходим синтез алгоритма оптимального управления $u^0 = u^0(x, t)$ на стадии проектирования, что наталкивается на существенные трудности. Более прост поиск $u^0(t)$ САУ с прогнозирующей моделью в процессе работы системы.

Уравнение Беллмана для данной задачи имеет вид:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \min_u \left[\frac{\partial S}{\partial x} \cdot (f + \varphi u) + Q + U + U^* \right] = 0 . \qquad (9.1)$$

Минимизация по u, т. е. дифференцирование по u и приравнивание производной к 0, приводит к решению в неявном виде:

$$\frac{\partial S}{\partial x} \cdot \varphi + \frac{\partial U}{\partial u} = 0 . \qquad (9.2)$$

Подставляем (9.2) в (9.1) и учитываем дополнительное условие, налагаемое на функции U и U^*:

$$U + U^* - \frac{\partial U^*}{\partial u^0} \cdot u \ge 0 .$$

Данное условие означает, что левая часть этого неравенства должна быть положительно-определенной функцией относительно u, принимающей минимальное значение, равное 0 при $u = u^0$.

В результате получим уравнение в частных производных, называемое уравнением Ляпунова:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} \cdot f = -Q . \qquad (9.3)$$

Привлекая для решения этого уравнения метод характеристик, можно показать, что искомое решение строится на интегральных кривых, удовлетворяющих обыкновенным дифференциальным уравнениям свободного движения объекта ($u \equiv 0$):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, t), & (9.4) \\ \dot{p}(t) = -\left(\dfrac{\partial f}{\partial x}\right)^T p - \left(\dfrac{\partial Q}{\partial x}\right)^T, & (9.5) \end{cases}$$

где $p = \left(\dfrac{\partial S}{\partial x}\right)^T$ – вектор частных производных функции Беллмана S по компонентам вектора состояния.

Уравнение (9.5) может быть также получено из (9.3) непосредственным дифференцированием по x и изменением порядка дифференцирования.

Кроме того, при вычислении функции $S(x, t)$ на свободной траектории ($u \equiv 0$) из (9.3) вытекает уравнение

$$\dot{S}(t) = -Q(x, t)\,. \tag{9.6}$$

Уравнения (9.4), (9.5) и (9.6) составляют основу алгоритмов оптимизации с прогнозирующей моделью. Суть этих алгоритмов сводится к тому, что на основе интегрирования этих уравнений строится решение уравнения (9.3) и тем самым решается оптимизационная задача. Упрощение состоит в том, что не требуется поиска структуры функции $S(x, t)$ во всей области ее определения, а требуется лишь вычисление ее значений в некоторой окрестности текущего состояния, достаточной для вычисления градиента $\dfrac{\partial S}{\partial x}$, который затем используется в (9.2) для вычисления $u^0(t)$.

9.3. Синергетические оптимальные САУ

Название «синергетика» произошло от греческого «синергос» – «вместе действующий» и обозначает общенаучное направление, изучающее совместные действия нелинейных динамических систем различной природы. Базовые положения синергетической теории заключаются в следующем:

1. В синергетических системах в процессе самоорганизации происходит уменьшение числа степеней свободы, т. е. управляемая декомпозиция фазового пространства, путем выделения лишь нескольких координат, к которым подстраиваются остальные. Именно эти так называемые макропеременные $\psi_i(x_1, \ldots, x_n)$ и определяют основные особенности динамики системы, открывая возможность построения упрощенных агрегированных моделей.

2. Следствием этого процесса самоорганизации является образование в фазовом пространстве так называемых аттракторов – инвариантных многообразий $\psi_i = 0$, к которым притягиваются траектории системы.

3. Каждый аттрактор имеет свою область притяжения в фазовом пространстве, отделенную границей от других областей. При-

чем направленная самоорганизация обеспечивает выход на желаемый аттрактор за счет соответствующего выбора алгоритма изменения управляющих воздействий как функций координат системы.

Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов состоит из следующих этапов:

1. Постановка задачи. Объект управления (ОУ) описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{x} = f(x, u),$$

где $x \in R^{n\times 1}$ – вектор состояния.

Требуется найти закон управления $u^0(x)$, который обеспечивает перевод изображающей точки из произвольного начального состояния сначала в окрестность инвариантного многообразия $\psi(x_1, \ldots, x_n) = 0$, а затем дальнейшее устойчивое асимптотическое движение вдоль этого многообразия в желаемое состояние, в частности, в начало координат.

Примером решения подобной задачи может служить известная оптимальная по быстродействию система второго порядка, в которой $\psi(x_1, x_2) = 0$ – уравнение линии переключения, с которой изображающая точка должна сначала сблизиться, а затем двигаться вдоль нее к началу координат.

2. Выбор агрегированных макропеременных, т. е. функций $\psi_i(x_1, \ldots, x_n)$. Эти функции могут строиться различными способами, и их поиск является главной задачей проектирования. Этот поиск пока в большей мере носит эвристический характер.

3. Нахождение закона оптимального управления производится без решения оптимизационной задачи. Изменение макропеременной $\psi(t)$ считается оптимальным, если минимизируется так называемый сопровождающий оптимизирующий функционал, имеющий, в частности, вид улучшенной квадратичной оценки:

$$J_{20} = \int_0^\infty [\psi^2(t) + T^2\dot{\psi}^2(t)]\,dt\,.$$

Как известно, минимум такому функционалу доставляет асимптотически стремящаяся к 0 экспонента, являющаяся общим решением так называемого функционального уравнения:

$$T\dot{\psi}(t) + \psi(t) = 0\,.$$

Затем определяют производную от макропеременной по времени, как от сложной функции в силу уравнений объекта. Эту производную и саму макропеременную подставляют в функциональное уравнение и находят отсюда искомый закон оптимального управления. Сопровождающий оптимизирующий функционал с учетом $\psi(x)$ и позволяет также найти критерий качества, по которому оптимизируется синтезируемая система. Он содержит высокие степени координат, что существенно улучшает важные показатели качества в отношении быстродействия, перерегулирования, демпфирования колебаний и др. Особенно эти достоинства проявляются в областях значительных отклонений изображающей точки от заданного состояния.

Пример. Заданы уравнения движения самолета в вертикальной плоскости:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3u, \end{cases}$$

где x_1 – угол атаки; u – отклонение руля высоты.

1-й вариант:

1.1. Агрегированную макропеременную выберем линейной

$$\psi(x_1, x_2) = \beta_1 x_1 + x_2.$$

1.2. Находим производную от нее по времени с учетом уравнений ОУ:

$$\dot{\psi} = \beta_1 x_2 + \dot{x}_2 = \beta_1 x_2 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3u.$$

1.3. Подставляя ψ и $\dot{\psi}$ в функциональное уравнение, находим закон оптимального управления:

$$u^0 = -\frac{1}{a_3}\left(a_1 + \frac{\beta_1}{T}\right)x_1 - \frac{1}{a_3}\left(a_2 + \beta_1 + \frac{1}{T}\right)x_2.$$

1.4. Подставляя этот закон в уравнения объекта, получим уравнения замкнутой системы:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{\beta_1}{T}x_1 - (\beta_1 + \frac{1}{T})x_2, \end{cases}$$

условия устойчивости которой $\beta_1 > 0$ и $T > 0$. Совместное решение приводит к одному уравнению:

$$\frac{T}{\beta_1}\ddot{x}_1 + (T + \frac{1}{\beta_1})\dot{x}_1 + x_1 = 0,$$

которое при $\xi = \frac{1+\beta_1 T}{2\sqrt{\beta_1 T}} \geq 1$ эквивалентно апериодическому звену второго порядка с особой точкой типа «устойчивый узел» (рис. 9.5).

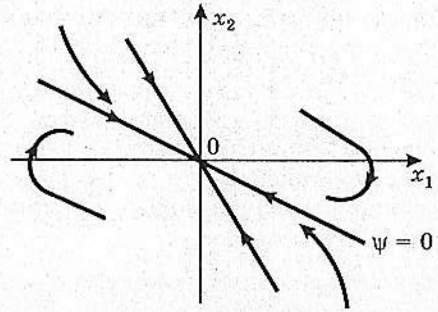

Рис. 9.5

Многообразие $\psi = 0$, т. е. $x_2 = -\beta_1 x_1$, является прямолинейной фазовой траекторией, стремящейся к началу координат.

2-й вариант:

Если применить нелинейную макропеременную

$$\psi = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^3 + x_2,$$

то аналогично определим нелинейный закон оптимального управления:

$$u^0 = -\frac{1}{a_3}\left[\left(a_1 + \frac{\beta_1}{T}\right)x_1 - \left(a_2 + \beta_1 + \frac{1}{T}\right)x_2 - \frac{\beta_2}{T}x_1^3 - 3\beta_2 x_1^2 x_2\right].$$

Из уравнения многообразия $\psi = 0$ найдем x_2 и, подставив в первое уравнение ОУ, получим нелинейное дифференциальное уравнение движения САУ вдоль многообразия $\psi = 0$ к началу координат (рис. 9.6):

$$\dot{x}_1 = -\beta_1 x_1 - \beta_2 x_1^3.$$

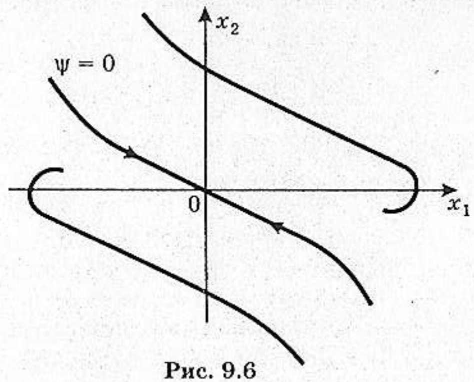

Рис. 9.6

Как и в первом варианте, это уравнение более низкого (первого) порядка, чем уравнение ОУ. При $\beta_1 > 0$ и $\beta_2 > 0$ свободное движение устойчиво в целом.

9.4. Интеллектуальные системы автоматического управления

Создание систем, ориентируемых для работы в условиях неполноты или нечеткости исходной информации, неопределенности внешних возмущений и среды функционирования, требует привлечения нетрадиционных подходов к управлению с использованием методов и технологий искусственного интеллекта. Такие системы, названные интеллектуальными системами управления, образуют совершенно новый класс. Это понятие возникло в начале 80-х гг. XX в.

В качестве базовых выделяются 4 интеллектуальные технологии:

- технология экспертных систем, ориентированная на обработку знаний с явной формой представления в виде продукционных правил;
- технология нечеткой логики, ориентированная на обработку логико-лингвистических моделей представления знаний с помощью продукционных правил и размытых множеств;
- технология нейросетевых структур с неявной формой представления знаний, скрытых в архитектуре сети, параметрах нейронов и связей;
- технология ассоциативной памяти, ориентированная на обработку знаний с неявной формой представления в виде гиперповерхности в многомерном пространстве признаков.

Отсюда, в частности, видно, что основной отличительной чертой интеллектуальных систем автоматического управления является возможность системной обработки знаний, под которыми понимается проверенный практикой результат познания действительности, верное ее отражение в мышлении человека. Знания позволяют отнести сложившуюся ситуацию к некоторому классу, для которого требуемое управление считается известным согласно теории ситуационного управления Д.А. Поспелова и его научной школы. Одна из передовых тенденций в области обработки знаний состоит в интеграции различных интеллектуальных технологий для сочетания их преимуществ.

Организация интеллектуальных систем автоматического управления производится по следующим пяти принципам:

- наличие тесного информационного взаимодействия интеллектуальной системы автоматического управления с реальным внешним миром при использовании информационных каналов связи;
- наличие прогнозов изменения внешнего мира и собственного поведения системы;
- многоуровневый характер иерархической структуры в соответствии с правилом: повышение интеллектуальности и снижение требований к точности по мере повышения ранга иерархии;
- сохранение функционирования при разрыве связей от высших уровней иерархии;
- повышение интеллектуальности и совершенствование собственного поведения.

9.5. Основы фази-управления

9.5.1. Базовые понятия фази-логики

Fuzzy-logic переводится как нечеткая логика. К базовым, или первичным, понятиям относятся «нечеткое множество» и «лингвистическая переменная». Нечетким множеством M называется подмножество x множества X, которое характеризуется непрерывной функцией принадлежности (ФП) $\mu_M(x)$, могущей принимать любые значения между 0 и 1, что можно истолковать, как «значение x может быть в данном множестве с вероятностью $\mu_M(x)$». Множество M может быть записано как совокупность пар значений x и $\mu_M(x)$, т. е. в виде:

$$M = \{(x, \mu_M(x)); x \in X\}.$$

Лингвистической переменной называют такую переменную, которая задана на количественной шкале базисной переменной x и принимает значения в виде слов и словосочетаний. Отдельное лингвистическое значение (терм) задается с помощью одной функции принадлежности, т. е. каждому терму соответствует нечеткое множество.

В теории фази-управления для лингвистического описания выходной переменной ОУ x и сигнала ошибки ε наиболее часто применяют следующий универсальный набор из семи термов с