

положила начало современной теории автоматического регулирования. Поэтому Вышнеградский по праву считается основоположником науки об автоматическом управлении в целом. Он первый из плеяды отечественных ученых, которые, как будет видно из последующего, внесли решающий вклад в становление и развитие этой науки.

Непосредственным последователем И. А. Вышнеградского и продолжателем его работы стал Ауфель Стодола — словак по национальности, большую часть жизни проведший в Швейцарии, где заведовал кафедрой машиностроения в Цюрихском политехникуме.

Стодола распространил линейный анализ Вышнеградского на не прямое регулирование, где управление поступлением рабочего тела в турбину производится не непосредственно центробежным маятником через систему рычагов как при прямом регулировании, а через сервомотор. (Обычно в качестве сервомотора использовался гидравлический двигатель, управляемый золотником, механически связанным с центробежным маятником, как показано на рис. П1.2.)

В 1893 г. Стодола опубликовал работу "О регулировании турбин", посвященную регулированию гидравлических турбин — проблеме, которая в те годы приобрела более важное значение как для практики, так и для теории, чем регулирование паровых турбин. Стодола учел в системе регулирования трубопровод и получил описывающее эту систему регулирования уравнение шестого порядка (против третьего порядка у Вышнеградского). Не будучи знаком с работой Рауса, он обратился к математику Цюрихского политехникума А. Гурвицу с просьбой найти необходимые и достаточные условия устойчивости, которым должны удовлетворять коэффициенты многочлена n -й степени, чтобы его корни имели отрицательные действительные части. Гурвиц в 1893 г. нашел такие условия, которые получили известность как критерий устойчивости Гурвица.

Следующая фундаментальная работа Стодолы "Принцип регулирования Сименсов и американские инерционные регуляторы" (1899) относится к проблемам прямого регулирования, но в виде комбинированного регулирования по скорости и ускорению (ПД-регулирование). Стодола показал, что добавление сигнала по ускорению позволяет реализовать устойчивое астатическое регулирование, и сформулировал в качестве условия устойчивости наличие в регуляторе кулоновского трения. Все свои результаты Стодола представил в виде диаграмм, которые обобщают диаграммы Вышнеградского.

П1.2.2. Направления развития современной ТАУ

В XX в. линейная теория автоматического регулирования получила новые области технического применения в электротехнике. Помимо регулирования скорости электрических двигателей решались задачи регулирования частоты

и напряжения электрических генераторов, в том числе в электрических энергосистемах, регулирования различных переменных в других областях техники — температуры, расхода, давления, стабилизация движения по траектории различных объектов, групповое движение строим.

Во всех этих областях в основе теоретических исследований и инженерных расчетов использовалась линейная ТАУ, в основе которой лежат идеи Вышнеградского и предложенная им форма записи уравнений динамики с безразмерными коэффициентами и временем, позволяющая минимизировать число варьируемых параметров.

Примерно до 40-х гг. прошлого века центральное место в теории регулирования занимало исследование устойчивости. Затем основным предметом исследований постепенно стало качество переходных процессов, т. е. определение таких показателей качества, как колебательность, перерегулирование, быстродействие. И здесь начало было положено методами, основанными на исследовании расположения корней характеристического уравнения системы в комплексной плоскости, т. е. на развитии подхода Вышнеградского, представленного его диаграммой. Отсюда развились корневые критерии качества и модальные методы синтеза. Затем появились частотные и статистические методы и, наконец, методы исследования нелинейных систем. Однако все эти методы получили свое развитие уже в рамках теории автоматического управления (ТАУ), частью которой стала теория регулирования. Последняя, однако, не потеряла своего самостоятельного значения и своей области применения, а следовательно, и специфики. Но история ее самостоятельного развития на этом закончилась, дав жизнь более общей ТАУ.

§ П1.3. Теория автоматического управления

П1.3.1. Линейная теория автоматического управления

Теория автоматического управления (ТАУ) создавалась как развитие и обобщение теории автоматического регулирования. Поэтому первым ее этапом стало распространение линейной теории автоматического регулирования на более общую задачу управления объектами и процессами.

Постепенно были определены следующие наиболее общие понятия ТАУ в целом:

- разомкнутые и замкнутые (с отрицательной обратной связью) системы;
- системы управления по задающему воздействию и по возмущающему воздействию (системы компенсации);

сис
системы,

сис

сис

сис

сис

сис

ные, имп

сис

И, на
ного сис

Общ
этапы:

м

а
ных и о

м

р
стацион

Разр
как бы

XIX в.

состав
путем

этом н
витель

Эта
основе

отнош
систем

дифф
Ра

преоб

По
получ
ферен

- системы автоматического регулирования (стабилизации), следящие системы, системы программного управления;
- системы одномерные и многомерные;
- системы несвязанного (автономного) и связанного управления;
- системы линейные (линеаризуемые) и нелинейные;
- системы стационарные и нестационарные;
- системы непрерывные (непрерывного действия) и дискретные (релейные, импульсные и цифровые);
- системы адаптивные и интеллектуальные.

И, наконец, были сформулированы задачи параметрического и структурного синтеза, задача оптимизации и понятие оптимальных систем.

Общая последовательность развития линейной ТАУ включает следующие этапы:

- математическое описание;
- анализ устойчивости и качества переходных процессов в одноконтурных и одномерных системах;
- методы коррекции и синтеза таких систем;
- распространение этих методов на многоконтурные, многомерные, нестационарные и дискретные системы.

Разработка методов математического описания линейных САУ началась, как было указано, с работ Д. К. Максвелла и И. А. Вышнеградского в конце XIX в., в которых на основе метода малых колебаний был предложен метод составления дифференциальных уравнений динамики одноконтурных систем путем линеаризации исходных нелинейных уравнений с отбрасыванием при этом нелинеаризируемых нелинейностей типа сухого трения и зоны нечувствительности.

Эта форма описания САУ, т. е. ее математической модели, получается на основе дифференциальных уравнений звеньев системы и алгебраических соотношений, определяющих связи между ними. В результате исключения в системе этих уравнений промежуточных переменных получается линейное дифференциальное уравнение n -го порядка.

Развитием этой формы математического описания САУ стало применение преобразования Лапласа и передаточных функций.

Позднее был предложен более общий метод математического описания, получивший название метода пространства состояний, в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка, т. е. в нормальной форме Коши.

Как было показано, начало исследований устойчивости линейных САУ положили Максвелл и Вышнеградский. Они инициировали и разработку первых критериев устойчивости — это алгебраические критерии Рауса — Гурвица. (Много позже в 1914 г. Лъенар и Шипар предложили еще одну упрощенную модификацию критерия Гурвица.)

В первой половине XX в. появились частотные критерии устойчивости. В 1932 г. американский ученый Найквист предложил для радиотехнических усилителей с обратной связью получивший его имя критерий устойчивости по частотной характеристике разомкнутой системы. В 1936 г. отечественный ученый А. В. Михайлов предложил свой частотный критерий. В 1946 г. Г. Боде и Мак Колл разработали метод исследования устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам.

Частотные методы, основанные на удобном для инженерной практики графическом представлении динамических процессов, до этого были разработаны и применялись в теории связи и радиотехники. В 40-е годы XX в. они получили признание и дальнейшее развитие в теории управления.

К этому же времени относятся разработки методов оценки качества переходных процессов в линейных системах, основанных на алгебраических и частотных подходах, предложенных ранее для исследования устойчивости.

Завершающий этап исследования систем автоматического управления — построение и анализ переходных процессов. Для этого были разработаны аналитические и численные методы, основанные на решении дифференциальных уравнений системы и приближенные графические методы с помощью переходных и частотных характеристик. Однако с развитием ЭВМ все они постепенно потеряли актуальность.

Завершающим этапом становления линейной ТАУ, отличным от детерминированного подхода Вышнеградского и Стодоль, стала статистическая теория управления, основанная на теории вероятностей и математической статистике. основополагающими работами здесь стали линейная теория фильтрации случайных процессов Н. Винера и А. Н. Колмогорова (1941), оптимальный линейный фильтр и наблюдатель Р. Калмана и Р. Бьюси (1961), теория синтеза линейных динамических систем по квадратичному критерию А. М. Летова и Р. Калмана (1964).

Опыт применения методики синтеза по квадратичному критерию показал, что полученные таким образом системы управления оказываются чувствительными даже к малым изменениям значений параметров, т. е. негрубыми. Это сделало актуальными задачи оценки чувствительности, исследованной Е. Н. Розенвассером и Р. М. Юсуповым (1981), и синтеза грубых систем управления. (Впервые понятие "чувствительность" ввел Т. Боде (1945).) Это в свою очередь вызвало развитие теории робастных систем, нечувствительных к изменениям параметров в определенном "интервале принадлежности".

В этой
рием с
функц
(В ск
функц
ных м
нелин

Важ
метод
начало
мики
ройств
тирую
коррек
вых ма

В д
устрой
для од
тотные
статис

Сле
стала р
решен
управл
заций
ходных
обратн

Оси
сформи
числен
мирова

Зада
требует
пробле
вание
теория

Заве
для ли
мальны

По
первый

В этой связи, в частности, возникла теория H^∞ оптимизации, в которой критерием оптимальности была предложена H^∞ норма многомерной передаточной функции замкнутой системы в виде относительной энергии на ее выходе. (В скалярном варианте эта норма равна максимуму амплитудной частотной функции.) Теорию H^∞ оптимизации можно трактовать как развитие частотных методов оценки качества. Позднее эта теория была распространена и на нелинейные системы.

Важнейшая задача ТАУ — синтез САУ, поскольку эта основа инженерных методов создания конкретных таких систем. Развитие методов синтеза САУ началось в линейной ТАУ с разработки методов и средств улучшения динамики таких систем (их устойчивости и качества) — корректирующих устройств последовательных, основным из которых стало ПИД-звено, и корректирующих обратных связей — гибких, инерционных и т. д. Первые такие корректирующие устройства появились еще в системах регулирования паровых машин.

В дальнейшем были разработаны методы выбора типа корректирующих устройств и значений их параметров, прежде всего в рамках линейной ТАУ для одномерных объектов и следящих систем. В основу были положены частотные, корневые и интегральные критерии устойчивости и качества, а также статистические методы.

Следующим качественно новым этапом решения проблемы синтеза САУ стала разработка теории и методов структурного синтеза таких систем в виде решения задачи синтеза алгоритмов управления для заданного объекта управления. В начале они находились как функции времени, т. е. для реализации в виде систем программного управления, а затем — как функции выходных переменных объекта управления, т. е. в виде замкнутой системы с обратными связями.

Основу этих разработок составила теория оптимального управления, сформировавшаяся прежде всего на базе классического вариационного исчисления, принципа максимума С. Л. Понтрягина и динамического программирования Р. Беллмана.

Задача синтеза алгоритма управления для заданного объекта управления требует прежде всего знания его математической модели. Отсюда возникла проблема идентификации, включая определение структуры объекта и оценивание его параметров по экспериментальным данным, и соответствующая теория и методика.

Завершением развития методов синтеза оптимальных систем управления для линейных объектов стал "Метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов" (метод АКОР) Летова — Калмана.

По мере становления теории автоматического управления постепенно на первый план стало выходить исследование нелинейных систем управления и

разработка методов их проектирования, поскольку все реальные системы заведомо нелинейны. Однако одновременно продолжалось совершенствование и линейной теории, т. к. она имела свою самостоятельную область применения в ТАУ, а следовательно, и свои задачи развития. Из наиболее заметных направлений дальнейшего развития линейной ТАУ следует назвать уже упомянутые статистическую теорию управления, теорию инвариантности и чувствительности, теорию синтеза грубых систем и модального управления, как развития корневых методов, теорию H^∞ оптимизации.

В середине XX в. возникло новое научное направление — кибернетика. Книга его основателя Н. Винера "Кибернетика или управление и связь в животном и машине" (1948) инициировала плодотворную для дальнейшего развития ТАУ идею, исходя из общности принципов управления в технике и живой природе, использовать опыт живой природы в организации управления техническими системами.

На начальном этапе своего развития кибернетика не привнесла в ТАУ заметных новшеств. Объясняется это тем, что технические автоматические системы оказались весьма примитивными по сравнению с живыми прототипами. И только со времени после развития современных ЭВМ, сенсорных систем и адаптивных и интеллектуальных алгоритмов управления идея плодотворности технической реализации достижений живой природы стала приобретать все большее значение.

Сегодня кибернетика — это не отдельная наука, как, например, физика, биология, а комплексное научное направление, объединяющее знания различных наук с целью всестороннего изучения процессов управления и выработки единых принципов, общей теории управления и информации. Науку об управлении можно рассматривать как важнейшую часть кибернетики. Другая ее часть, относящаяся к информационным процессам — получению, передаче, обработке и хранению информации, к концу XX в. сформировалась в отдельную науку информатику, включающую теорию информации, искусственный интеллект, компьютерные сети и их приложения — информатизацию и компьютеризацию всех сфер человеческой деятельности. Обе эти науки тесно взаимосвязаны, каждая широко использует результаты другой, а их общей концептуальной основой и является кибернетика. При этом важнейшим положением этой концепции было и остается использование в технике знаний о живой природе, включая, конечно, человека.

П1.3.2. Нелинейная ТАУ

Фундаментальный вклад в теорию нелинейных систем управления, как уже было сказано в § П1.1, был сделан А. М. Ляпуновым, создавшим теорию устойчивости движения — прямой метод Ляпунова (метод функций Ляпуно-

ва). Эт
включая
и мето

Исс
отдел
ботке
нейнос
зация
о введ
свойст

Был
устойч
монич
модели

Исх
1934 г
делени
гармон
этого
темы.

лее по
неарит
ные м
включ
проце
статис
И. Е. I

Ме
стран
управ

Ка
рии с
стоящ
оптим

П

Ко
чени
плуат
требо

ва). Эта теория составляет основу современной нелинейной теории САУ, включая помимо устойчивости исследование качества процессов управления и методы структурного синтеза.

Исследование нелинейных систем управления началось с анализа влияния отдельных типовых нелинейностей в линейных в остальных системах, разработке способов ослабления влияния и нейтрализации нежелательных нелинейностей (компенсация статических нелинейностей, вибрационная линеаризация зон нечувствительности и лифтов и т. д.). Затем появились работы о введении специальных нелинейностей для улучшения динамических свойств систем.

Были разработаны методы исследования нелинейных систем — анализа устойчивости, качества, методы параметрического синтеза, в частности, гармоническая линеаризация, использование фазовой плоскости, компьютерное моделирование.

Исходная идея метода гармонической линеаризации была высказана в 1934 г. Н. М. Крыловым и Н. Н. Боголюбовым в виде предложения при определении параметров периодических режимов учитывать только основную гармонику колебаний. В 1946 г. Л. С. Гольдфарб предложил использовать для этого амплитудно-фазовую частотную характеристику линейной части системы. Этот метод получил название метода гармонического баланса. Наиболее полное изложение в современной трактовке метода гармонической линеаризации дано в монографии Е. П. Попова и И. П. Пальтова "Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем" (1960), включая использования его для оценки устойчивости, качества переходных процессов, влияния высших гармоник, а также совместное применение со статистической линеаризацией. Последний метод был предложен в 1954 г. И. Е. Казанцевым.

Метод исследования нелинейных систем в фазовом пространстве (пространстве состояний), начиная с фазовой плоскости, был введен в теорию управления А. А. Андроповым в 1946 г.

Как и в линейной ТАУ, завершающим этапом развития нелинейной теории стало создание методов синтеза нелинейных систем. Эта проблема к настоящему времени сформулировалась в отдельный раздел ТАУ — теорию оптимальных систем.

П1.3.3. Оптимальные САУ

Конечная цель разработки САУ, т. е. их проектирования, состоит в получении документации для изготовления (производства) и применения (эксплуатации) такой системы, которая удовлетворяла бы заданным техническим требованиям. Последние включают функциональное назначение системы,

требования к качеству функционирования (точность, быстродействие, энергопотребление, надежность и т. д. вплоть до стоимости). Особенность проектирования САУ заключается в том, что первостепенное значение из всех требований имеют показатели именно собственно процесса управления (алгоритмы, численное значение параметров, качественные показатели процесса управления) по сравнению с конструктивными и другими данными. (Правда, возможны особые случаи, например, для САУ некоторых подвижных объектов, когда на первое выступают такие показатели, как массогабаритные, энергопотребление и т. п.)

Перечисленные выше методы исследования линейных и нелинейных САУ позволили разработать различные методы такого синтеза на соответствие заданным требованиям. Однако при создании САУ, как и других технических систем, весьма желательно иметь представление об их теоретически предельных возможностях. Это важно для того, чтобы оценить технический уровень разработанной системы по степени ее близости к теоретически предельному уровню и, конечно, для того, чтобы, прежде всего, убедиться в принципиальной реализуемости системы с требуемыми свойствами.

Для решения этой задачи во второй половине XX в. в ТАУ сформировался специальный раздел оптимальных САУ. В нем содержатся математические методы структурного и параметрического синтеза систем управления на оптимум критериев, дающих количественную оценку их основных характеристик. По существу, этот раздел ТАУ является чисто математическим, т. е. разделом математики, и входящие в него методы разработаны математиками.

Для предельно простого линейного приближения, но дающего зато строго аналитическое решение этой задачи, разработаны методы такого синтеза оптимальных САУ, основанные на перечисленных выше методах исследования линейных систем. К ним же относятся упомянутые выше методы оптимальной линейной фильтрации Колмагорова — Винера и Калмана — Бьюси.

Для нелинейных САУ с одной нелинейностью были разработаны методы синтеза на основе прямого метода Ляпунова. В общем случае нелинейной системы применяется классическое вариационное исчисление, которое и было создано в свое время по запросам практики, хотя и без связи с проблемой управления. В середине XX в. были разработаны методы оптимизации, позволяющие численно на ЭВМ решать значительно более сложные задачи. Это, прежде всего, уже упомянутые принцип максимума Л. С. Потрягина (1961), метод динамического программирования Р. Беллмана (1957). На основе этих общих математических методов были разработаны уже инженерные методы синтеза САУ, ориентированные на свойства конкретных объектов управления — упомянутый выше метод АКОР Летова — Калмана (1960), метод функционала обобщенной работы (ФОР) А. А. Красовского (1973), синергетический подход А. А. Колесникова (1994), методы самоорганизующих-

ся систем
лекта.

В ход
растави
матическ
хождение
основе —
математи
физическ
необходи
если они
реальны
управлен
последст

Прог
неизбеж
ния, к у
инженер
следнее
потребн
следует
техниче

П1

Теор
ТАУ. К
ТАУ, в
учебны
учебны
неров п

Одна
ставил
дания с
разделу

П1

Инте
искусст

ся систем, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта.

В ходе развития этого раздела ТАУ усилились расхождения, иногда перераставшие даже в почти конфликтные противопоставления формально математической линии развития ТАУ и прикладной инженерной ТАУ. Эти расхождения впервые возникли еще на этапе становления линейной ТАУ. В их основе — растущий отрыв ТАУ, развивающейся все больше в сторону чисто математических задач, от реальных инженерных потребностей с учетом их физических особенностей. Конечно, абстрактно математические разработки необходимы и закономерны для развития теории управления, однако опасно, если они не доводятся до инженерных методов, учитывающих особенности реальных задач управления и практически важные характеристики объектов управления, таких как динамические перегрузки, энергозатраты, возможные последствия нештатных режимов работы и отказов и т. п.

Прогрессирующее усложнение технических систем и задач управления неизбежно привело к росту такого расхождения теории и практики управления, к увеличению значения эмпирических решений, основанных на опыте инженеров-практиков, особенно при создании наиболее сложных систем. Последнее означает, что имеет место и растет отставание современной ТАУ от потребностей практики. Проблема эта стоит на повестке дня, и ее появление следует рассматривать как естественный процесс развития теории в области технических наук в целом.

П1.3.4. Адаптивное управление

Теория адаптивных систем управления — это сравнительно новый раздел ТАУ. Ко второй половине XX в. полностью сложилась ставшая классической ТАУ, включающая адаптивные и оптимальные системы. У нас в стране после учебных пособий по автоматике, например [5], и ТАР появились первые учебные пособия [3], а затем и учебники по ТАУ [18]. Начался выпуск инженеров по автоматическому управлению.

Однако уже к концу XX в. непрерывное усложнение задач управления поставил перед практикой, а следовательно, и перед теорией новую задачу создания систем интеллектуального управления. Эта задача относится к новому разделу теории управления, который формируется в настоящее время.

П1.3.5. Интеллектуальное управление

Интеллектуальное управление — это управление, основанное на методах искусственного интеллекта (ИИ). Возникновение метафорического понятия

"искусственный интеллект" тесно связано с кибернетикой, коренной смысл которой, как выше было сказано, в использовании опыта живых организмов. В данном случае речь идет о воспроизведении интеллекта людей.

Научное направление, получившее в 60-е годы прошлого столетия название "искусственный интеллект", возникло в ходе исследований по созданию все более "разумных" технических систем. Начало этому было положено использованием математической логики с созданием соответствующих компьютерных программ (доказательство теорем, анализ сложных структур, игры и т. п.).

После осознания ограниченных возможностей такого формально-математического подхода по сравнению с мышлением человека начали разрабатываться основанные на данных психологии и физиологии человека методы искусственного интеллекта, воспроизводящие особенности мышления человека — это нечеткая логика, ассоциативная память, нейронные структуры. Эти методы вместе с математической логикой и составляют содержание современного искусственного интеллекта.

В табл. П.1 и на рис. П.17 дано сопоставление решения задач целесообразного поведения в живой природе и технике. Как отсюда следует, для полноценного воспроизведения разумного поведения в технических системах наряду с используемыми в ИИ формализованными символьными методами необходимо создание информационных систем, оперирующих образной информацией, с которой в основном связаны творческие способности человека, его интуиция. Психологи отделяют этот тип мышления от понятия интеллект в виде отдельного понятия "креативность" (творческие способности). Если следовать этому, то надо принять, что после интеллектуальных систем в будущем должны появиться еще более совершенные разумные системы, в которых наряду с символьным (интеллектуальным) информационным каналом будет существовать образный (креативный) канал. Конечно, это вопрос терминологии, а существом является объективная перспектива дополнения перечисленных выше методов ИИ методами обработки образной информации и ее использования в управлении.

В основе классической ТАУ лежат, во-первых, два принципа управления — принцип обратной связи и принцип компенсации возмущающих воздействий, а во-вторых, разделение САУ на объект управления и устройство управления, синтез которого осуществляется на основе типизации этих объектов и соответственно алгоритмов управления ими. До поры до времени такой подход был необходим и плодотворен. Именно он позволил создать современную ТАУ.

Однако непрерывный рост сложности объектов управления, задач управления ими и одновременно потребность в достижении все более высокого качества управления, вплоть до теоретически предельного в рамках физической реализуемости, подвел ТАУ к новому этапу ее развития. Он заключается

Таблица П.1.1. Сравнительные характеристики информационных систем живых организмов и технических систем

Назначение	Живые организмы, включая человека	Технические системы	Сравнение технических средств с органами живых существ	Задачи создания технических систем
1. Сенсорика (рецепторы): Видеоинформация	Зрение	ТВ- и ПЗС-камеры	Работа в более широком диапазоне частот с визуализацией и с большей чувствительностью	—
Звук	Слух	Микрофоны и т. п. аппаратура	Соответствуют	—
Химический состав	Обоняние, вкус	Химические датчики	Далеко не соответствует	Создание химических сенсоров, не уступающих живым существам (обоняние, вкус) и специальных сенсоров (парктрон, взрывчатка, радиоактивность и т. п.)
Контакты	Осязание	Тактильные датчики	Соответствуют	—
Словное воздействие	Болевое ощущение	Силовые датчики	Соответствуют	—
Температура	Температурные рецепторы	Температурные датчики	Работа в более широком диапазоне с большей чувствительностью	—
Положение в пространстве	Вестибулярный аппарат	Гироскопы, акселерометры	» »	—
"Височувствительные параметры"	—	Специальные сенсоры, интроскопы	Нет аналогов в живом мире	—

Таблица П.1.1 (окончание)

Назначение	Живые организмы, включая человека	Технические системы	Сравнение технических средств с органами живых существ	Задачи создания технических систем
2. Обработка сенсорной информации	Образная обработка в нейронных структурах, вкл. мозг	Цифровые микроэлектронные устройства, компьютеры	На этапе первичной обработки соответствуют. По распознаванию образов существенно уступают	Создание аналогов нейронных систем образной обработки сенсорной информации и их комплексирование
3. Формирование моделей среды	Для полушария головного мозга дают два типа моделей — образную и вербальную	» »	Отсутствуют образные модели	Создание нейронной образной ассоциативной памяти
4. Оценка ситуации и принятие решений	» »	» »	Отсутствует интуитивное творческое мышление	Создание нейронной модели образного мышления, включающее творчество
5. Планирование поведения	Работают оба полушария. Конечный результат в левом	» »	» »	» »
6. Управление движением	Работают оба полушария и периферийная нервная система	» »	» »	» »

6. Управление движением	Работают оба полушария и периферийная нейронная система	» »	» »	» »
-------------------------	---	-----	-----	-----

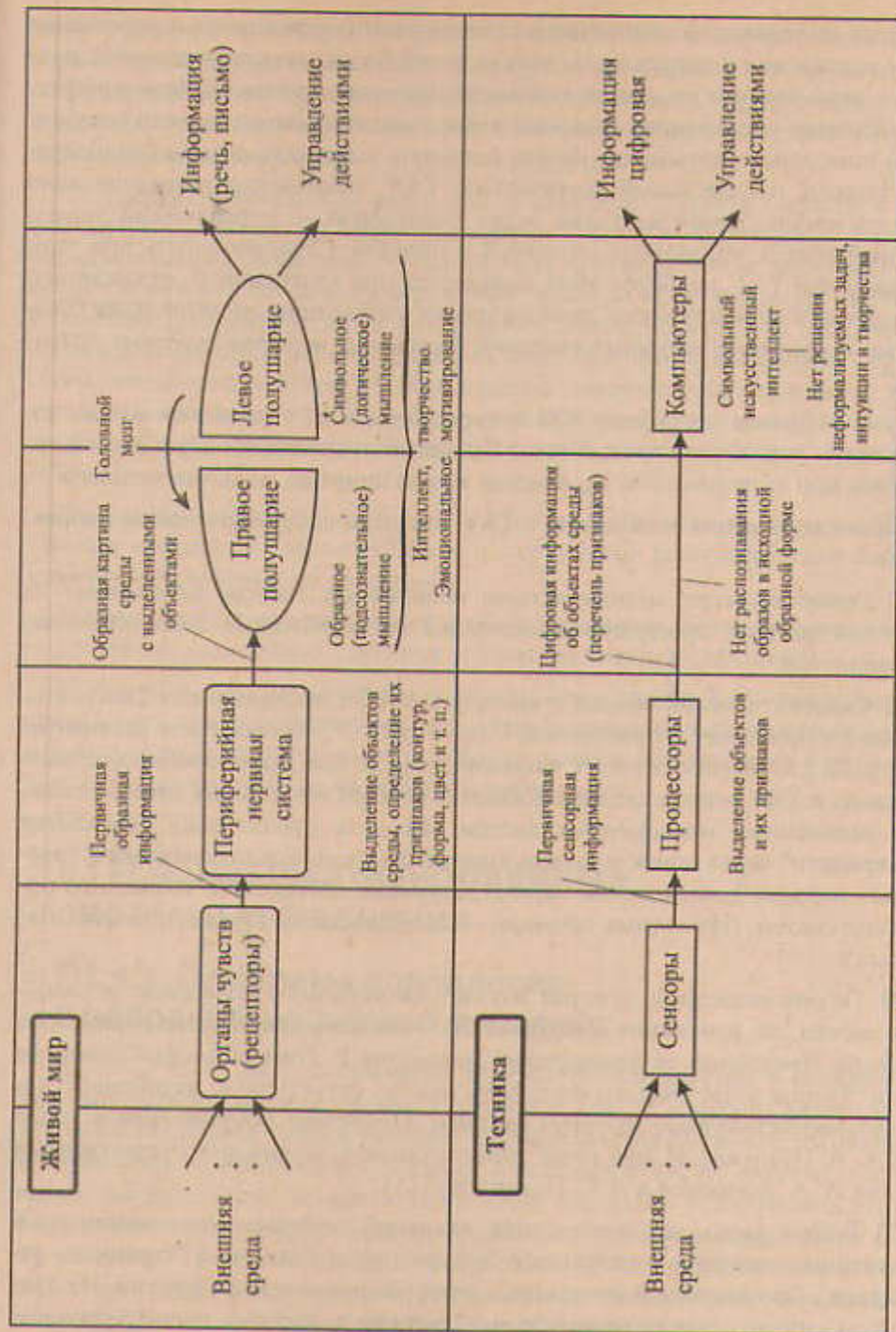


Рис. III.17. Сенсорно-информационная структура в живом мире и в технике

в отходе от указанной типизации и соответственно усреднения и упрощения задач управления в направлении поиска путей более "индивидуального" подхода к этим задачам на основе глубокого изучения и учета свойств конкретных объектов управления с максимальным учетом их естественного (свободного) поведения. Разумеется, начать следует с задач, для которых стандартный подход, предлагаемый современной ТАУ, оказывается принципиально неприемлемым. Примеры таких задач управления — управляемый термоядерный синтез, управление экологией и погодой. Ограниченность при этом современной ТАУ наиболее ярко выявляется при сравнении с организацией управления в живой природе даже на уровне управления движением, не говоря уже о принятии разумных решений в сложных неформализуемых ситуациях.

Таким образом, на рубеже XXI в. перед наукой об управлении встали новые задачи управления прежде всего большими и сложными объектами и освоением при этом способов управления живой природы, включая человека.

В рамках решения этой задачи в ТАУ возникли следующие новые направления.

□ Геометрические методы теории нелинейных систем, основанные на развитии понятия пространства состояний на нелинейные топологические пространства.

□ Синергетический подход к синтезу САУ. Родоначальником синергетики был И. Пригожин, а приложение к синтезу САУ, которое было рассмотрено в п. 12.3.5, разработал А. А. Колесников [13]. Как было показано, применительно к ТАУ этот подход представляет особый интерес для синтеза сложных нелинейных многомерных систем как путь преодоления "проклятия размерности" через поиск и использование обобщенных переменных ("параметров порядка"), однозначно характеризующих состояние и возможное поведение систем. (Известные примеры — коэффициенты Фурье, функции Ляпунова.)

□ Теория катастроф, которая изучает качественное поведение нелинейных систем, их изменения (бифуркации) и связь со значениями параметров системы. Предложил ее французский математик Р. Тома во второй половине XX в. Теория катастроф изучает, в частности, структурную устойчивость и структурно-устойчивые (грубые) системы. Последнее понятие ввел в конце XIX в. А. Пуанкаре. В 30-е годы этой проблемой занимались отечественные ученые А. А. Андронов и Л. С. Понтрягин [11].

□ Теория хаоса, как нового типа движений, которые могут возникать в нелинейных системах в результате бифуркаций и появления "странного аттрактора". Эти движения относятся к детерминированным системам. Их траектории сильно зависят от начальных условий и поэтому непредсказуемы:

незначи
угодно б
А. Пуан
процесс
витель

□ Те
француз
обладаю
когда ч
Коха (ш
протяжк
ского, м
чательн
дробь)
1919).

Фран
тальные
добие т

Пере
сущест

И, ко
предел
дов иск
ных мет

§ П
СИ

П1.
В Ч

В §
ких авт
исходн
и науки
время.
том уро
му чело
структу
ганизат

незначительное изменение исходного состояния может приводить к сколь угодно большим изменениям конечного состояния. Впервые это так же изучил А. Пуанкаре. Затем их изучение вошло в синергетику. Практически такие процессы могут возникать в системах с нелинейностями типа зоны нечувствительности, сухого трения, с упругими деформациями.

□ Теория фрактальных процессов и структур. Термин "фрактал" ввел французский математик Бенуа Мандельброт (1975). Хаотические системы обладают новым свойством — фрактальной структурой, т. е. самоподобием, когда части подобны целому. Известные примеры таких структур: снежинка Коха (шведский математик Хельге фон Кох получил эту фигуру бесконечной протяженности при конечных размерах самой фигуры) (1904); ковер Серпинского, множество Кантора. Математическое описание фракталов имеет замечательную особенность — дробную размерность, превышающую (на эту дробь) размерность самого объекта (немецкий топограф Феликс Хаусдорф, 1919).

Фракталы могут быть не только в пространстве, но и во времени (фрактальные процессы). Они могут быть и случайными (статистическое самоподобие типа броуновского движения).

Перечисленные новые понятия и теории являются базой создания теории существенно нелинейных, сложных и больших систем управления.

И, конечно, отдельным новым направлением развития ТАУ, выходящим за пределы его традиционной тематики, станет освоение указанных выше методов искусственного интеллекта, а в более далекой перспективе — интуитивных методов, основанных на образной информации.

§ П1.4. Автоматизированные системы управления

П1.4.1. Проблема управления в человеко-машинных системах

В § П1.1 было дано обоснование неизбежности появления и развития таких автоматизированных систем управления (АСУ) вопреки, казалось бы, исходной тенденции замены человека автоматикой. Развитие как техники, так и науки идет от простого к сложному и поэтому в XX в., наконец, настало время, когда объекты и задачи управления настолько усложнились, что на том уровне техники управления эти задачи можно было решать только самому человеку. Тем более, когда в состав таких объектов управления входили структуры, включающие людей. Это производственные, экономические, организационные и тому подобные сложные образования.

Наряду с такими АСУ предметом исследования этого направления стали большие автоматизированные системы массового обслуживания (авиационные, железнодорожные и т. п.) и контроля сложных объектов (летательных аппаратов, морских судов, крупных радиотехнических комплексов).

В отношении техники управления основным средством решения подобных задач стали компьютерные системы вплоть до глобальных и численное моделирование.

Теоретической основой исследования человеко-машинных (биотехнических) систем и комплексов стали теория больших систем, исследование операций, системный анализ. Сами эти науки возникли в значительной степени в связи с появлением подобных систем и связанными с ними новыми проблемами.

Началом систематического исследования "больших систем" принято считать книгу Л. Барталанфи "Общая теория систем", вышедшую еще в 30-е годы XX в., и книгу Дж. Грига "Прикладная теория систем" (1981). Термин "системный анализ" был введен в 1948 г. корпорацией РЭНД. Под ним понимались методы исследования сложных систем, для которых формальные математические методы недостаточны, и их необходимо дополнить эвристическими методами, основанными на интуиции и опыте. В дальнейшем понятие "системный анализ" приобрело более широкий смысл, охватив все и математические и эвристические методы, объединенные концепцией системного подхода к анализу и ориентированные прежде всего на сложные системы.

Одним из первых обобщений системного подхода к созданию больших технических систем была книга Г. Х. Гуда и Р. Э. Маккола "Системотехника" (1957). Развитие системного подхода применительно первоначально к приборостроению получило в новом научно-техническом направлении "Мехатроника", сформировавшемся как синтез микроэлектроники и электромеханики на базе современных методов автоматического управления.

Отдельная проблема, которая резко обострилась на рубеже XXI в. и была рассмотрена в § П1.1 — это проблема "человеческого фактора". Она требует особого исследования и концептуальных решений, ориентированных на особенности и тенденции развития современной сложной техники.

Пожалуй, наиболее общий подход к исследованию и созданию больших автоматизированных систем дают научные направления "исследование операций" и "большие системы".

П1.4.2. Исследование операций

Исследование операций — это теория принятия решений, которая возникла во время Второй мировой войны применительно к военным операциям.

Отсюда ее название. Задача исследования операций совпадает с теорией оптимального управления в ТАУ, но ориентирована на более сложные объекты с участием в них людей и входит вместе с ТАУ в общую науку об управлении, включающую человека, принимающего решения. Понятие "большая система" тоже относится к этой общей теории управления.

Если раньше в период становления и развития ТАУ главной задачей было исключение человека из процесса управления, то на новом этапе развития науки об управлении ставится более общая задача совместной работы техники и людей. Общий принцип при этом — системный подход с единых позиций ко всем частям системы, включая технику и людей.

Этапы процедуры исследования операций:

- определение целей системы;
- изучение ее структуры;
- определение (выбор) критериев эффективности системы;
- построение модели;
- синтез плана действия (на основе математического программирования, математической статистики, теории игр и т. п.).

Математический аппарат исследования операций — это сетевое планирование, теория расписаний (определение порядка следования операций), управление ресурсами (материальными и людскими), управление запасами (неиспользованными ресурсами), теория массового обслуживания, теория игр (исследование операций в конфликтных ситуациях).

П1.4.3. Большие системы

"Большая система" — это термин, определяющий системы такого уровня сложности, который требует особого подхода к их теории и методам проектирования. Сложность системы определяется количеством и характером ее частей, связей между ними и с внешней средой. Факторами, усложняющими систему, являются, в частности, наличие в ее составе человека (биотехнические системы) и сильных связей с внешней средой (открытые системы). (Открытыми называются системы, у которых обмен с внешней средой (информацией, энергией, материалами) не просто необходимо учитывать при их рассмотрении, а является определяющим в их функционировании.) На сложность системы влияет также степень ее изменяемости и знания ее структуры и параметров. Сложные системы, как правило, имеют иерархическую структуру и ее части сами представляют собой системы (подсистемы). Наиболее сложные системы — это отраслевые, многоотраслевые, государственные и, наконец, глобальные системы — транспортные (авиационные, железнодоро-

рожные, водные), энергетические, информационные (системы связи, компьютерные сети).

Большие системы — это настолько сложные системы, что их описание нельзя свести к формальным математическим моделям, а оно включает принципиальные, т. е. не от недостатка знания, неопределенности и неоднозначности, которые допускают только лингвистическое описание.

Основным принципом создания и исследования больших систем является системный подход. В данном случае он означает рассмотрение системы как единого целого, состоящего из взаимосвязанных частей, с учетом взаимодействия с внешней средой. При этом свойства системы не сводятся к сумме свойств ее частей, а их совокупность создает качественно новые свойства (эмергентность), для определения которых и требуется системный подход.

Системный подход означает использование общесистемных показателей качества, охватывающих все аспекты системы — функциональный (распределение функций системы между ее частями), организационный (структура системы, ее части) и компонентный (анализ частей). По этим показателям формируются критерии качества, используемые в процессе проектирования системы и при оценке ее технического уровня.

Наряду с системным подходом при рассмотрении отдельных сторон функционирования больших систем используется, когда это возможно, и принцип декомпозиции. При этом цели и соответствующие функции системы распределяются между ее частями (подсистемами), которые затем исследуются автономно. После этого уже исследуются их взаимовлияния и корректируются ранее независимо найденные решения. В целом такая декомпозиция возможна в пространстве "по горизонтали" (разделение на подсистемы и далее), "по вертикали" (по иерархическим уровням) и во времени (временное и частотное разделение процессов).

Использование принципа декомпозиции, конечно, упрощает проектирование ("разделяй и властвуй"). Однако он неизбежно приводит к снижению качества создаваемой системы и поэтому может использоваться только, когда это снижение допустимо в рамках требований технического задания или когда системный подход встречает непреодолимые трудности.

Правда, иногда при создании технических систем специально требуется обеспечить автономность отдельных ее подсистем по условиям эксплуатации. В этом случае такая автономность достигается специальными мерами путем введения взаимных компенсирующих воздействий и тогда применение принципа декомпозиции становится оптимальным подходом к проектированию системы.

Зак

Предм
ческих с
разработ
лены эта
автомато

Время
До н. э.
XVIII в.
Начал XIX в.
Начал XX в.
Сере XX в.

Заключение

Предмет науки об управлении — изучение процессов управления в технических системах (САУ) и в системах, включающих людей (АСУ), а также разработка принципов и методов такого управления. В табл. П1.2 представлены этапы развития этой науки, рассмотренные выше, от первых древних автоматов до современной ТАУ и компьютеризированных АСУ.

Таблица П1.2. Хронология развития науки и техники управления

Время	Техника управления	Научные результаты	Примечания
До н. э.	Автоматы древности. Герон Александрийский (I в. до н. э.)	В основном разомкнутое однопрограммное управление	Такие автоматы применяются до настоящего времени для продажи мелких штучных товаров
XVIII в.	Автоматы механиков- часовщиков. И. П. Кулибин, Жак де Вокансон, Пьер и Анри Жаке-Дро	Разомкнутое многопрограммное управление	Эти автоматы остались непревзойденными по сложности и точности
	Ткацкий станок-автомат с программным управлением. Жаккард	Разомкнутое программное управление от перфокарты	Прообраз современных устройств ЧПУ
Начало XIX в.	Паровая машина с автоматическим регулятором. И. И. Ползунов, Дж. Уатт, Ж. В. Понселе	Становление ТАУ. Д. К. Максвелл, И. А. Вышнеградский, А. Стодола	Такого типа регуляторы применяются до настоящего времени
Начало XX в.	Станки-автоматы для махинообработки и др.	Жесткая механически реализованная программа	Применяются до настоящего времени как вариант жесткой автоматки
Середина XX в.	Роторные и роторно-конвейерные линии. Л. Кошкин	Высшее достижение жесткой автоматки с непревзойденной производительностью. Развитие линейной и начало нелинейной ТАУ	Применяются до настоящего времени в массовом и крупносерийном производстве легких изделий
	Энергетические, транспортные и другие системы автоматических машин с централизованным программным управлением	Развитие принципов и систем группового автоматического управления	Основа современных систем такого же назначения

Таблица П1.2 (окончание)

Время	Техника управления	Научные результаты	Примечания
	Станки и другое технологическое оборудование с ЧПУ	Гибкая автоматизация, в том числе мелкосерийного производства	Основной компонент современной промышленности
Вторая половина XX в.	Промышленные роботы с ЧПУ	Формирование робототехники	Основной компонент современной промышленности
	Гибкие производственные системы на основе оборудования с ЧПУ	Комплексная гибкая автоматизация	Основа современной промышленности
	Первые АСУ производством, РВСН, ПВО и др.	Современные компьютеризированные человеко-машинные системы и комплексы	Создание новой элементной базы повышенной надежности для таких систем
	Адаптивное управление технологическим оборудованием, роботами, летательными аппаратами	Развитие теории адаптивных САУ	Развитие потребностей в различных сенсорных системах
	Развитие крупных вплоть до глобальных АСУ энергетическими, транспортными, информационными комплексами	Развитие САПР, а затем CALS-технологий	Обострение проблемы "человеческого фактора"
Конец XX в.	Первые интеллектуальные роботы, летательные аппараты и другие машины и системы	Развитие научного направления "Искусственный интеллект"	Сформировались основные направления развития техники в XXI в.
Начало XXI в.	Развитие работ по миниатюризации компонентов автоматических систем с использованием 3D-микросистемных технологий. Создание на их основе новых поколений роботов, летательных аппаратов, медицинских и других систем	Развитие микросистемных технологий и методов проектирования соответствующей техники	Развитие компонентной базы техники XXI в.

Первоначально целью науки и техники управления было замена человека при управлении различными машинами. Развитие в этом направлении привело к созданию интеллектуальных САУ. Концептуальной основой этой тенденции стала кибернетика.

Одновременно с развитием науки и техники управления участвует человек. Первое направление над автоматизацией: управление — это верхнем уровне системы с блокированными (через ТАУ, а так

В результате автоматической науки об управлении кибернетике прежнему когда техника контролирует

Основными

эксп

числе в пр

мате

ком

Велосипеды и методы и а основные человеческие

С наступлением ответственности мы практикуют современную "человеческого фактора" проблему но залась пе

Наука валаась не явилась математики решения С

та П1.2 (окончание)

Замечания
Важнейший компонент современной промышленности
Важнейший компонент современной промышленности
Особенности современной промышленности
Внедрение новой элементной базы повышенной надежности для систем
Изменение потребностей современных сенсорных систем
Решение проблемы "человеческого фактора"
Изменились основные направления развития техники в XXI в.
Изменение компонентной техники XXI в.

замена человека в управлении привнесла новую эту тен-

Одновременно возникла и стала развиваться теория систем управления с участием человека (АСУ). Эти системы развивались в двух направлениях. Первое направление, когда человек представляет верхний уровень управления над автоматическим объектом, т. е. дополняет САУ своим разумом. Примеры: управление роботами, электрическими станциями. Второе направление — это когда человек входит в состав объекта управления, который на верхнем уровне может управляться, в том числе и автоматически. Примеры: системы ситуационного управления ПВО, портов, системы автоматического блокирования ошибочных действий человека-оператора особенно в нестандартных (чрезвычайных) ситуациях. Теоретической основой таких АСУ стала ТАУ, а также психология и физиология.

В результате развития этих двух направлений в управлении, включающих автоматические и человеко-машинные системы, и сформировалась общая наука об управлении. Ее можно рассматривать как новый этап развития кибернетики в направлении симбиоза техники и человека. Основан он по-прежнему на общности происходящих в них информационных процессов, когда техника обогащается участием человека, а человек дополняется и контролируется техническими информационными средствами.

Основные методы современной теории управления включают:

- экспериментальное исследование объектов и систем управления, в том числе в процессе их эксплуатации;
- математическое моделирование и аналитическое исследование;
- компьютерное моделирование и численный эксперимент.

Вследствие сложности объектов и процессов исследования аналитические методы имеют ограниченное применение в современной теории управления, а основным средством исследования с возможностью доведения его до количественных результатов является компьютерный численный эксперимент.

С наступлением XXI в. в связи с возрастанием сложности объектов и соответственно задач управления возросло несоответствие между потребностями практики по разработке конкретных систем управления и возможностями современной науки об управлении. Обострилась и проблема "человеческого фактора". Все это поставило перед современной наукой об управлении проблему новых подходов и путей решения этих задач. Теория управления оказалась перед качественно новым этапом своего развития.

Наука об автоматическом управлении возникла и длительное время развивалась на базе механики как ответ на ее запросы. По мере развития ТАУ появилась новая генерация ученых — чисто управленцев, преимущественно математиков, которые приступили к развитию математических методов изучения САУ. Это был необходимый этап формирования науки об управлении.

Однако вскоре он выявил и определенную опасность, заключающуюся в отрыве теории от физической природы процессов и объектов управления. Молодая наука не избежала этой опасности, и теория управления стала все более отходить от потребностей инженерной практики. В результате стало развиваться альтернативное направление в теории управления, ставящее на первое место именно физическую сущность подлежащих автоматизации процессов, как это было на начальном этапе становления ТАУ, но уже с охватом, помимо механики, объектов другой природы — химии, экономики и т. д.

Таким образом, в истории развития науки об автоматическом управлении можно выделить три этапа:

□ начальный этап, развитый учеными и инженерами-механиками, который был ориентирован на конкретные задачи практики, т. е. на инженерные задачи;

□ второй этап, развиваемый в основном учеными-математиками, ориентированный на развитие математического аппарата ТАУ, т. е. на задачи ее собственного развития как науки;

□ третий, современный этап возврата к ориентации на потребности практики и решения ее конкретных задач.

Последний этап, конечно, не означает отказа от математических методов, созданных на предыдущем этапе. Это диалектически обоснованный возврат по спирали на качественно новом уровне к подходу, породившему ТАУ, и признак наступившей зрелости этой науки.

Это синтез физической сущности процессов управления и адекватных ей математических методов их описания. Разумеется, при этом неизбежно происходит и определенная переоценка достижений второго этапа с дополнением их новыми теориями и методами, наиболее очевидные из которых были названы выше.