

КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Д.А. Новиков

Аннотация. Рассмотрены классификации систем управления по таким базовым основаниям, как: тип, цель и вид управления, модель объекта управления, время, изменение свойств объекта управления (ОУ) во времени, размерность входов и выходов, возмущения, неопределенность, число ОУ, способность приспособления к изменениям, распределенность одного ОУ, структура ОУ, число управляющих систем, структура системы управления (СУ), связи между управляющей и управляемой системами, автономность ОУ, использование знаний, проявления стратегического поведения. В качестве дополнительных предложено применять основания классификации: средства управления, природа и «отраслевая» специфика объектов управления, а также функциональные свойства СУ и ОУ.

Ключевые слова: система управления, модель объекта управления, неопределенность, структура, оптимизация, стратегическое поведение.

ВВЕДЕНИЕ

С одной стороны, почти каждый учебник или учебное пособие по математической теории управления содержит набор классификаций систем управления. С другой стороны, как и в любой активно развивающейся науке, в теории управления пока не сформировалась устоявшаяся и общепризнанная система классификаций. Настоящая работа представляет собой попытку дать, следуя в основном работе [1], современный «срез», включающий в себя набор базовых (см. § 1) и дополнительных (см. § 2) оснований и значений признаков классификации систем управления. Краткому обсуждению учебно-методического обеспечения преподавания теории управления в высшей школе посвящен § 3. Основной акцент при этом делается на комплекте из двух учебных пособий — [1] и [2].

1. БАЗОВЫЕ КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Управление — воздействие на *управляемую систему* с целью обеспечения требуемого ее поведения [3]. *Система управления (СУ)* включает в себя три составные части — *управляемую систему*, *управляющую систему* и *связи между ними*.

Исследование и разработка любой системы управления требуют решения, как минимум, двух основных задач — анализа и синтеза.

Анализ — исследование управляемой системы (ее динамики, чувствительности по параметрам,

начальным и внешним условиям и др.), а также таких свойств СУ, как (см. подробное описание, например, в работе [2]):

— *управляемость* (возможность, используя допустимые управляющие воздействия, перевести за конечное время управляемую систему из заданного начального состояния в требуемое конечное состояние);

— *наблюдаемость* (возможность однозначно определить состояние управляемой системы, имея информацию о ее выходе и управляющих воздействиях);

— *устойчивость* (способность системы возвращаться к состоянию равновесия после прекращения воздействия, нарушившего это равновесие);

— *робастность* (выполнение закона управления при наличии возмущений; в общем случае — сохранение системой требуемых свойств при любых допустимых значениях неопределенных параметров).

Синтез — построение закона/алгоритма управления, обеспечивающего требуемые свойства СУ и поведение управляемой системы.

Системы управления можно классифицировать по различным почти независимым основаниям (т. е. конкретная система управления определяется совокупностью значений признаков классификации по всем основаниям).

1. Первым основанием классификации систем управления служит **тип управления**, определяемый степенью автоматизации функций управле-

Таблица 1

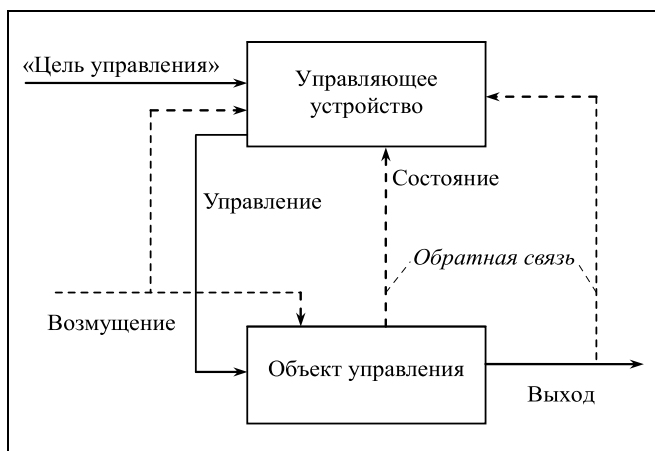


Рис. 1. Базовая структура системы автоматического управления

ния. В зависимости от того, включают ли элементы системы управления человека (всегда являющегося *субъектом*¹), получаем три (из четырех логически возможных¹) комбинации — типы управления, приведенные в табл. 1 [4]. В управляемую систему могут входить технические, природные, биологические, социальные и другие компоненты (см. далее рис. 8).

Автоматическое управление соответствует случаю, когда и управляющая, и управляемая системы представляют собой технические или кибернетические объекты. Раздел теории управления, исследующий задачи автоматического управления, называется *теорией автоматического управления* (ТАУ).

Автоматизированное управление соответствует случаю, когда управляющая система является субъектом — например, человеко-машинной системой, в которой наиболее важные и ответственные решения принимает человек, а управляемая система представляет собой технический или кибернетический объект².

¹ Четвертый тип — объект-субъектный (когда регулятор «управляет» человеком) — тоже встречается, но рассматривать его отдельно мы не будем (примеры: тренажер, когда управляющее устройство направляет деятельность обучаемого; кардиостимулятор; светофор, регулирующий поведение водителей на перекрестке, и т. п.).

² Автоматизированная система управления, как правило, включает в себя и «автоматические», и «человеческие» компоненты. Например, в управлении технологическими процессами информация о состоянии объекта управления может собираться и обрабатываться в автоматическом режиме. На основании этой информации человек-оператор принимает решение (быть может, учитывая автоматически генерируемую системой поддержки принятия решений «советующую» информацию). Затем принятое решение доводится до объекта управления «автоматически». Если человек управляет объектом без средств автоматизации, то такое управление называется ручным (пример — езда на велосипеде).

Типы управления

Тип управления	Управляющая система	Управляемая система
Автоматическое управление (объект-объектное)	Управляющее устройство, регулятор	Объект управления
Автоматизированное управление (субъект-объектное)	Управляющий субъект	Объект управления
Организационное управление (субъект-субъектное)	Управляющий субъект	Управляемый субъект

Организационное управление соответствует случаю, когда и управляющая, и управляемая системы являются субъектами, т. е. когда люди управляют людьми.

Рассмотрим *систему автоматического управления* (САУ) [2], представленную на рис. 1 (штриховыми линиями обозначены сущности, которые в зависимости от конкретной рассматриваемой модели могут присутствовать или отсутствовать) и включающую в себя *объект управления* (ОУ) и *управляющее устройство* (УУ, регулятор).

Объект управления характеризуется своими *состоянием* и *выходом* (в отличие от состояния, выход ОУ всегда считается полностью известным). Состояние и выход ОУ могут изменяться во времени³ и зависеть от управления (*управляющего воздействия*), *цели управления* (например, минимизация отклонения от *задающего воздействия*) и *возмущений*, отражающих влияние *внешней среды*. Эта зависимость называется *моделью ОУ* (МОУ). В рамках базовой структуры САУ модель ОУ используется на этапах решения задач анализа и синтеза САУ для выбора/настройки законов управления, параметров регулятора и т. д. — см., например, учебное пособие [2].

Если состояние ОУ не полностью измеряется, то применяют САУ с наблюдателем (*наблюдателем* называется алгоритмический блок, предназначенный для *оценивания* переменных состояния ОУ или

³ Теория управления имеет дело, как правило, с динамическими системами. Однако встречаются и ситуации (например, в организационном управлении [5]), когда рассматриваются только два состояния управляемой системы — начальное и конечное, т. е. управляющее воздействие применяется «однократно». Ряд задач оптимизации и исследования операций также может трактоваться как подобное управление «в статике».

внешней среды). На рис. 2 приведена структура САУ с наблюдателем, который в рамках некоторых модели ОУ и модели возмущений на основании известного выхода выдает оценку состояния ОУ.

«Расширенное управляющее устройство» (в рассматриваемом случае включающее в себя регулятор и наблюдатель) обозначено на рис. 2 (и рисунках далее) штриховым прямоугольником.

Здесь уместно сделать небольшое отступление и обсудить различия и связи реальной СУ и ее модели⁴, см. рис. 3 (вертикальная штриховая линия условно обозначает границу между реальным миром и «миром моделей», т. е. между реальной СУ и ее *цифровым двойником*).

Пусть задача заключается в разработке и создании некоторой реальной СУ, включающей в себя управляющую и управляемую системы.

Соответствующая *деятельность* имеет следующую структуру [4].

Сначала осуществляется *анализ* (I) — строится модель управляемой системы и проводится исследование управляемой системы и ее модели (ее динамики, чувствительности по параметрам, начальным и внешним условиям и др.), а также соответствующих свойств СУ (см. выше).

Затем осуществляется *синтез* (II) — построение закона/алгоритма управления, обеспечивающего требуемые свойства СУ и поведение управляемой системы. Отметим, что этот этап осуществляется в «мире моделей».

Результаты синтеза в процессе *конкретизации* (III) реализуются в реальной управляющей системе, которая осуществляет «регулирование» (IV) реальной управляемой системы.

Оценивание (V) позволяет осуществить *идентификацию* модели, сопоставить результаты деятельности ее целям, внести при необходимости *коррективы* (при несоответствии ожидаемого и наблюдаемого поведения управляемой системы) и перейти к следующему циклу.

Отметим, прежде всего, что, во-первых, приведенная на рис. 3 структура деятельности по созданию СУ универсальна для автоматического, автоматизированного и организационного управления. Далее, модель объекта управления может содержаться и в реальной СУ — см. рис. 4 и 6 ниже. «Рефлексивное» соответствие между реальной СУ и ее моделью (включающей в себя «модель модели») будет иметь тот же вид, что и в случае рис. 3.

2. Цель управления — обеспечение либо заданного значения (определяемого *задающим воздей-*

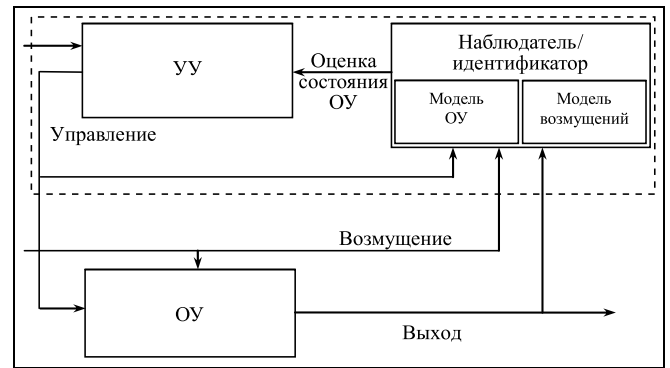


Рис. 2. Структура САУ с наблюдателем/идентификатором

ствием, уставкой) выхода ОУ — задача *стабилизации* (в этом случае управление иногда называется *регулированием*); либо заданной (или максимально близкой к требуемой) его динамики — задача *слежения*; либо экстремизация некоторого критерия качества — задача *оптимизации*. Конечно, стабилизация — частный случай слежения, а слежение — частный случай оптимизации.

Если одновременно применяются несколько критериев качества, то говорят о *многокритериальном управлении*.

3. Важное основание классификации состоит в том, применяется ли для выработки управляющих воздействий *обратная связь* (информация о состоянии и/или выходе ОУ — см. рис. 1). При наличии обратной связи СУ называются *замкнутыми* (в этом случае говорят о следующих **видах управления**: *управление по состоянию/выходу*, *управление по отклонению*, *управление с обратной связью*, *позиционное управление*). Обратные связи могут иметь сложную структуру [6]. Системы управления без обратной связи называются *разомкнутыми*.

В зависимости от числа обратных связей (при одном ОУ) различают *одноконтурные* и *многоконтурные* системы.

Разомкнутые системы, в свою очередь, подразделяются на имеющие такие виды управления:

— *программное управление* (управляющее воздействие представляет собой функцию только времени);

— *управление по возмущению* (управляющее воздействие зависит от возмущения).

Комбинированные системы управления являются «смешанными», например, в них управляющее воздействие может зависеть и от возмущения, и от выхода.

4. Модель объекта управления может быть линейной (*линейные системы*) или нелинейной (*нелинейные системы*). Если применяются методы прямого синтеза, то модели может вообще не быть (см., например, § 1.3 в учебном пособии [1]).

⁴ Модель — аналог определенного фрагмента природной или социальной реальности, «заместитель» оригинала в познании и практике.

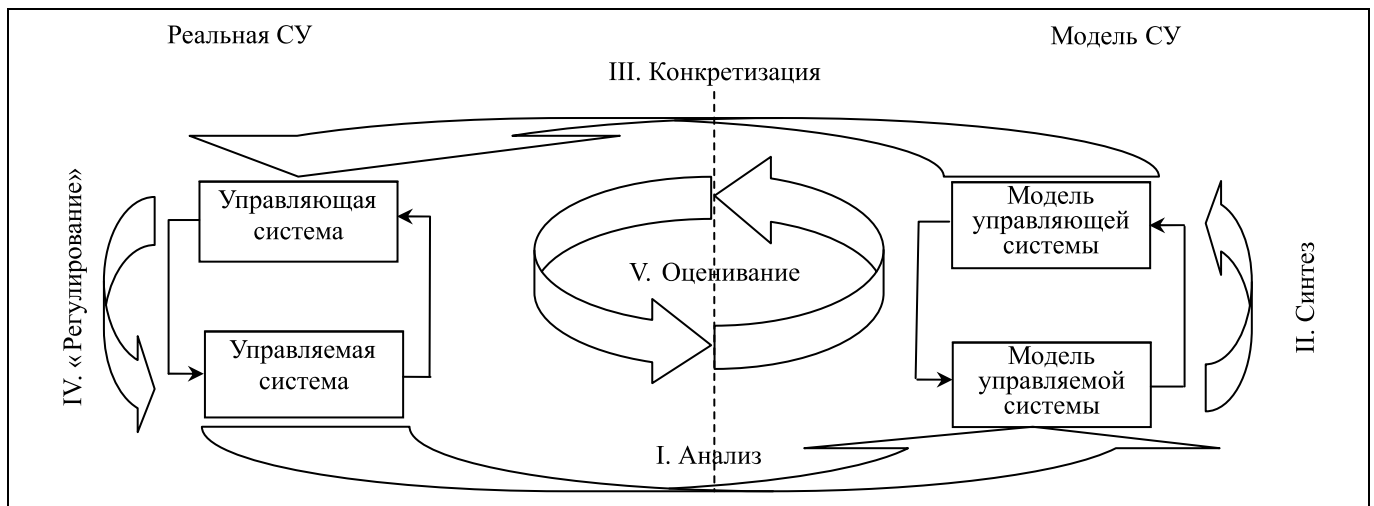


Рис. 3. Структура деятельности по созданию системы управления: реальная система управления и ее модель

В случае, когда характеристики объекта управления и/или внешней среды известны не полностью, для построения их адекватной модели на основе анализа данных входных и выходных сигналов, т. е. идентификации/оценки (и, соответственно, оценки состояния ОУ и возмущений), применяются САУ с идентификатором — см. рис. 2.

5. Модель объекта управления может рассматриваться в **непрерывном времени** (*непрерывные системы*) или в **дискретном времени** (*дискретные системы*⁵). Общепринятый аппарат описания модели ОУ — соответственно дифференциальные и разностные уравнения.

Часть переменных вектора состояния/выхода может меняться непрерывно, часть — изменяться дискретно (к примеру, в *логико-динамических системах* — см., например, [7, 8]).

6. Если имеет место **изменение свойств (характеристик/структуры/параметров) ОУ во времени**, то говорят, что он *нестационарный*; в противном случае ОУ называют *стационарным*.

7. В зависимости от **размерности** входа и выхода ОУ различают *одномерные* (SISO — Single Input Single Output) и *многомерные системы* (MIMO — Multiple Input Multiple Output или SIMO — Single Input Multiple Output, или MISO — Multiple Input Single Output).

8. **Возмущения** могут отсутствовать или присутствовать (не действовать, действовать). В последнем случае они могут быть *известными* или *неизвестными*. В случае неизвестных возмущений, в

⁵ В общем случае дискретными называют системы, в которых имеется квантование по уровню сигнала или/и время дискретно. В случае двух возможных состояний одного из элементов системы управления говорят о релейных системах.

зависимости от имеющейся о них информации, они могут быть *ограниченными* или *случайными*.

9. **Неопределенность** может отсутствовать (*детерминированные системы*) или присутствовать (*системы с неопределенностью* — см., например, гл. 1 в книге [1]).

В последнем случае неопределенность может иметь место относительно возмущений, модели объекта управления (включая, быть может, его начальное состояние), выхода или их комбинаций.

Неопределенность модели ОУ может иметь место относительно ее структуры (*структурная неопределенность*) или параметров (*параметрическая неопределенность*). Параметрическая неопределенность ОУ может быть *феноменологической*, происходящей из законов природы (Phenomenological Data) и *обусловленной данными* (Data Driven) — например, в идентификации.

В зависимости от информации, имеющейся о неопределенных факторах, различают *интервальную неопределенность* (известно только множество их возможных значений), *вероятностную неопределенность* (известно распределение вероятностей) и *нечеткую неопределенность* (известна функция принадлежности) [5].

10. В зависимости от **числа ОУ** различают *одноэлементные ОУ* и *многоэлементные ОУ*.

Если управляемых элементов несколько, и они взаимодействуют между собой, то говорят о *групповом управлении*.

Если различные элементы или подсистемы многоэлементной системы имеют существенно отличающиеся характерные времена или/и линейные размеры, то говорят о *разномасштабных системах*.

11. По способности к **адаптации** (возможности приспособления к изменяющимся внешним условиям) различают *неадаптивные* и *адаптивные системы* (см., например, § 1.2 в книге [1]). Среди последних выделяют самонастраивающиеся, экстремальные, самоорганизующиеся.

Изменяться могут: структура, характеристики/параметры как объекта управления, так и внешней среды («возмущений»). Эти изменения требуют соответствующих изменений характеристик/параметров управляющего устройства, за что в *адаптивном управлении* отвечает **блок адаптации** (рис. 4).

Отметим, что на рис. 4 (сравн. с рис. 2) модель объекта управления вынесена в самостоятельный блок (который может включать в себя и оптимизационную часть). Системы управления, существенно применяющие модели ОУ и внешней среды, называются *системами, основанными на моделях* (Model-based Control). Блоки идентификации и адаптации могут иметь сложную внутреннюю структуру и применять самые разные подходы и методы — экстремизационные, статистические и др. (см., например, [1, гл. 1]).

12. В зависимости от **распределенности объекта управления** (одного) в пространстве различают *системы с сосредоточенными параметрами* и *системы с распределенными параметрами*. Модели последних обычно описываются уравнениями в частных производных (см., например, § 3.1 в книге [1]).

13. В случае многоэлементных систем различают *базовую структуру ОУ* (один ОУ), *сетевую, иерархическую* и *смешанную структуру ОУ* (см., например, [1, гл. 3]).

14. В зависимости от **числа управляющих систем** различают системы с *одной* и *несколькими управляющими системами*.

15. В зависимости от **структуры СУ** выделяют четыре типа структуры СУ (см. далее рис. 11), приведенные в табл. 2.

Кроме того, следует различать *двухуровневые* (примерами являются СУ, приведенные на рис. 1, 2 и 4) и *многоуровневые СУ* [9]. Пример многоуровневой СУ приведен на рис. 5 (см. также рис. 9).

Таблица 2

Типы структур СУ

Число ОУ	Число управляющих систем	
	Одна	Несколько
Один	Базовая	Децентрализованная
Несколько	Веерная	Распределенная

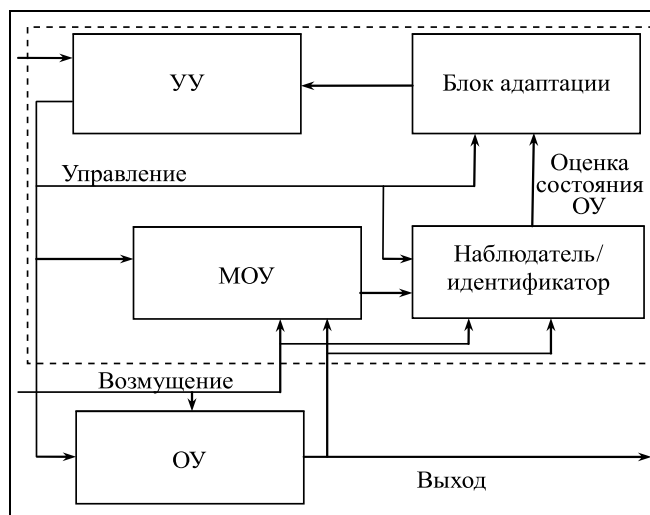


Рис. 4. Структура адаптивной системы автоматического управления с наблюдателем/идентификатором

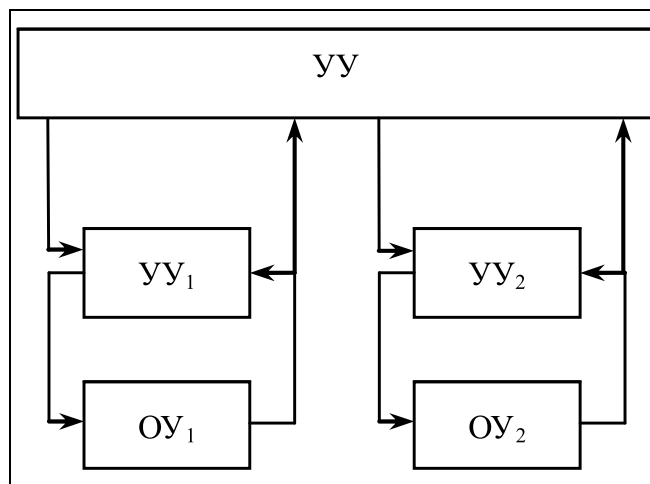


Рис. 5. Пример многоуровневой СУ

Многоуровневые СУ также могут характеризоваться *разномасштабностью* (как пространственной, так и временной).

16. **Связи** между управляющей системой и ОУ могут иметь базовый вид (см. рис. 1) или осуществляться через информационно-телекоммуникационную сеть. В последнем случае говорят о *сетевом управлении* (см. далее рис. 12).

17. В зависимости от **регулярности** вмешательства управляющей системы в функционирование ОУ разделяют *неавтономные системы* и *автономные системы*. В последних управление заключается в начальной «настройке» параметров, свойств и характеристик управляемой системы, которая затем функционирует «самостоятельно», в отсутствие управляющих воздействий.

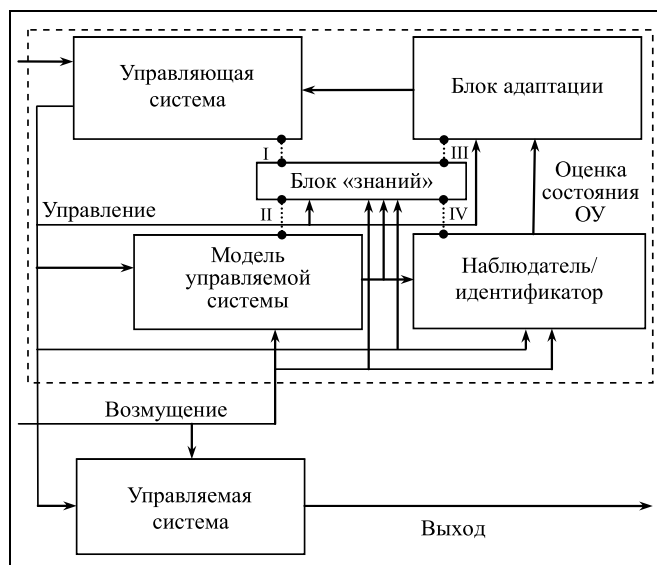


Рис. 6. Структура интеллектуальной системы управления

18. Важное основание классификации СУ заключается в **использовании знаний** ими. Системы управления, основанные на знаниях (Knowledge-Based Control) — см. рис. 6 (сравн. с рис. 2 и 4), включают в себя «блок знаний», который может иметь сложную внутреннюю структуру: включать в себя блоки хранения знаний, вывода, модификации/актуализации знаний и др. Более общую категорию составляют *интеллектуальные системы управления (ИСУ)*.

Причины появления и применения ИСУ могут заключаться в сильной нелинейности ОУ, отсутствии модели ОУ или модели внешней среды, существенности слабоформализованного опыта человека-оператора и др.

Важным для анализа ИСУ может быть использование результатов *анализа данных* о функционировании системы. Наиболее проработанный подход к использованию этой информации состоит в применении *параметрических* и *непараметрических методов идентификации*, а также методов *структурной идентификации*. Однако применение традиционных методов может быть проблематичным, поскольку реализация идентификационного синтеза характеризуется определенными трудностями. Прежде всего, при совмещении управления и оценивания управляемый процесс — нестационарный с зависимыми значениями, поэтому требование состоятельности оценок ограничивает класс стратегий управления. Помимо этих трудностей для широкого класса объектов (например, многомерных многосвязных систем) построение классических идентификационных моделей практически невозможно. Альтернативой могут слу-

жить методы адаптации, развиваемые начиная с работы [10] и использующие *индуктивные знания*, получаемые в результате анализа данных.

Ключевые категории, характеризующие ИСУ:

— *экспертные системы* (применяющие классический логический вывод или иные правила вывода);

— *нечеткая логика*;

— *искусственные нейронные (ИНС), иммунные, байесовы и другие сети*;

— *генетические алгоритмы* (класс эвристических методов локальной оптимизации) и *эволюционные вычисления*;

— *мягкие вычисления*;

— *когнитивные карты*.

Обзоры и классификации ИСУ можно найти в работах [7, 11–13]. Общая структура ИСУ приведена на рис. 6. Отметим, что это «максимальная» структура, редко встречающаяся в теории и на практике. Обычно ограничиваются вариантами (отмеченными на рис. 6 римскими цифрами) или их комбинациями (порождающими соответствующие классы ИСУ).

I. Знания используются в управляющем устройстве. Пример — *нечеткий регулятор*, или *нейросетевой регулятор*.

II. Знания используются в модели ОУ. Примером служат *глубокие нейронные сети* как модель ОУ.

III. Знания используются в процессе адаптации. Пример — *системы с переключениями*, в которых переключения в модели ОУ или переключения законов/режимов управления производятся экспертной системой на основании тех или иных правил вывода в зависимости от результатов оценивания/идентификации состояния и параметров ОУ и/или оценивания параметров внешних возмущений.

IV. Знания используются при оценивании/идентификации. Примером может служить применение экспертных систем для классификации состояний внешней среды.

Наверное, интеллектуальное управление сегодня является самым «модным» разделом теории управления. С одной стороны, модели и методы интеллектуального управления открывают большие новые возможности. С другой стороны, отнесение той или иной системы управления к классу «интеллектуальных» очень условно. Действительно, адаптивные системы управления 1960–1970-х гг. были «интеллектуальными» по сравнению со своими неадаптивными предшественниками. Системы управления, основанные на моделях, используют и накапливают в процессе своего функционирования знания о модели ОУ, т. е. могут трактоваться и как основывающиеся на знаниях. И т. д. С третьей стороны, следует иметь в виду, что, как и лю-

бой «моде», интеллектуальному управлению пока еще зачастую сопутствуют завышенные ожидания (особенно со стороны непрофессионалов), необоснованные биологические аналогии (особенно в области ИНС и генетических алгоритмов) и употребление соответствующей терминологии для создания иллюзии научности и актуальности.

19. Важное основание классификации СУ заключается в способности их элементов к так называемому **стратегическому поведению** — самостоятельному принятию решений в соответствии с собственными интересами. Проявления стратегического поведения [3, 5, 14]:

— самостоятельное целеполагание, целенаправленность поведения (сознательное искажение информации, невыполнение обязательств и др.);

— рефлексия (нетривиальная взаимная информированность, дальновидность, эффект обмена ролями и т. п.);

— ограниченная рациональность (принятие решений в условиях неопределенности и ограничений на объем обрабатываемой информации);

— кооперативное и/или конкурентное взаимодействие (образование коалиций, информационное и другое противодействие).

Аппаратом моделирования ОУ, способных к стратегическому поведению, служат *теория принятия решений* [15—17] и *теория игр* [18—21] (в том числе иерархических игр [22]) — см., например, [1, гл. 5]. Стратегическое поведение субъектов имманентно организационному управлению [5].

Сводка базовых классификаций систем управления приведена в табл. 3.

2. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ КЛАССИФИКАЦИИ

Помимо базовых, существует еще ряд распространенных оснований классификации систем управления.

Современная теория управления исследует проблемы управления различными классами объектов управления, разрабатывая или применяя соответствующие *методы и средства управления* (рис. 7). Как правило, при классификации систем управления речь идет в основном о «методах» управления, но средства управления и природа объектов управления также представляют собой важные основания классификаций систем управления.

Таблица 3

Базовые классификации систем управления

№	Основания классификации	Значения признаков
1	Тип управления	1. Автоматическое управление (управляющая и управляемая системы представляют собой технические или кибернетические объекты). 2. Автоматизированное управление (управляющая система представляет собой субъект, а управляемая система — технический или кибернетический объект). 3. Организационное управление (управляющая и управляемая системы являются субъектами)
2	Цель управления	Стабилизация, слежение, оптимизация
3	Вид управления	1. Управляющее воздействие не зависит от состояния/выхода ОУ (разомкнутые системы): — зависит от времени (программное управление); — зависит от возмущения (управление по возмущению). 2. Управляющее воздействие зависит от состояния/выхода ОУ (управление с обратной связью). 3. Комбинированное
4	Модель объекта управления	1. Линейная (линейные системы). 2. Нелинейная (нелинейные системы)
5	Время	1. Непрерывное (непрерывные системы). 2. Дискретное (дискретные системы)
6	Изменение свойств ОУ во времени	1. Стационарный ОУ (параметры/характеристики не меняются во времени). 2. Нестационарный ОУ (параметры/характеристики изменяются во времени)
7	Размерность входов и выходов	1. Одномерные системы. 2. Многомерные системы

№	Основания классификации	Значения признаков
8	Возмущения	1. Отсутствуют. 2. Присутствуют: — известные; — неизвестные; — ограниченные; — случайные
9	Неопределенность	1. Отсутствует (детерминированные системы). 2. Присутствует (системы с неопределенностью): — интервальная; — вероятностная; — нечеткая. Относительно: — возмущений; — начальных значений и/или граничных условий; — модели объекта управления: — структуры; — параметров; — выхода; — их комбинаций
10	Число объектов управления	1. Одноэлементные ОУ. 2. Многоэлементные ОУ
11	Способность приспособления к изменениям	1. Неадаптивные. 2. Адаптивные
12	Распределенность одного ОУ	1. Системы с сосредоточенными параметрами. 2. Системы с распределенными параметрами
13	Структура ОУ	1. Базовая. 2. Сетевая. 3. Иерархическая. 4. Смешанная
14	Число управляющих систем	1. Одна. 2. Несколько (многоэлементные СУ)
15	Структура СУ	1. Двухуровневая: — базовая; — веерная; — децентрализованная; — распределенная. 2. Многоуровневая: — базовая; — веерная; — децентрализованная; — распределенная
16	Связи между управляющей и управляемой системой	1. Базовые. 2. Сетевые (сетевое управление)
17	Автономность ОУ	1. Неавтономные. 2. Автономные
18	Использование знаний	1. Знания не используются. 2. Управление на основе знаний
19	Проявления стратегического поведения	1. Отсутствуют. 2. Целеполагание и/или выбор состояния. 3. Рефлексия. 4. Ограниченная рациональность. 5. Кооперативное и/или конкурентное взаимодействие

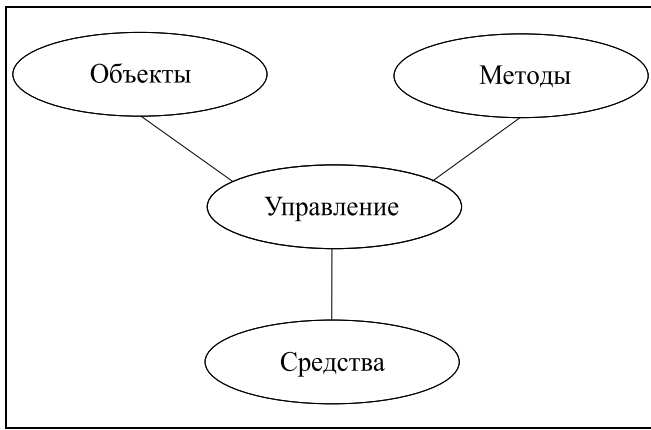


Рис. 7. Объекты, методы и средства управления

20. Различают **измерительные, преобразовательные, вычислительные и исполнительные средства управления**. В частности, к измерительным средствам относят и тесно связанные с проблематикой управления подвижными объектами системы *навигации*.

21. За полтора века своего развития (начиная с пионерских работ Д. Максвелла [23] и И.А. Вышнеградского [24]) теория управления охватила мно-

жество **классов объектов управления** (рис. 8) [14]: *технические, экономические, экологические, живые и социальные системы*. Все чаще объектами управления становятся так называемые *системы междисциплинарной природы* — организационно-технические, социально-экономические, эколого-экономические, социально-экологические и другие системы [3].

Каждый из этих классов ОУ может быть в свою очередь декомпозирован. Например, среди технических систем выделяют такие типовые прикладные направления, как:

- авиация и космос;
- морские подвижные объекты;
- промышленное производство;
- транспорт (авто-, железнодорожный и др.);
- энергетика;
- сельское хозяйство;
- робототехника (производственные роботы и мобильные роботы).

Каждый из этих классов ОУ обладает своей спецификой, требующей учета при разработке соответствующих систем управления — см., например, второй том справочника [25].

22. Задачи управления сложными системами, как правило, образуют гетерогенную иерархию, типовой вид которой приведен на рис. 9 [14].

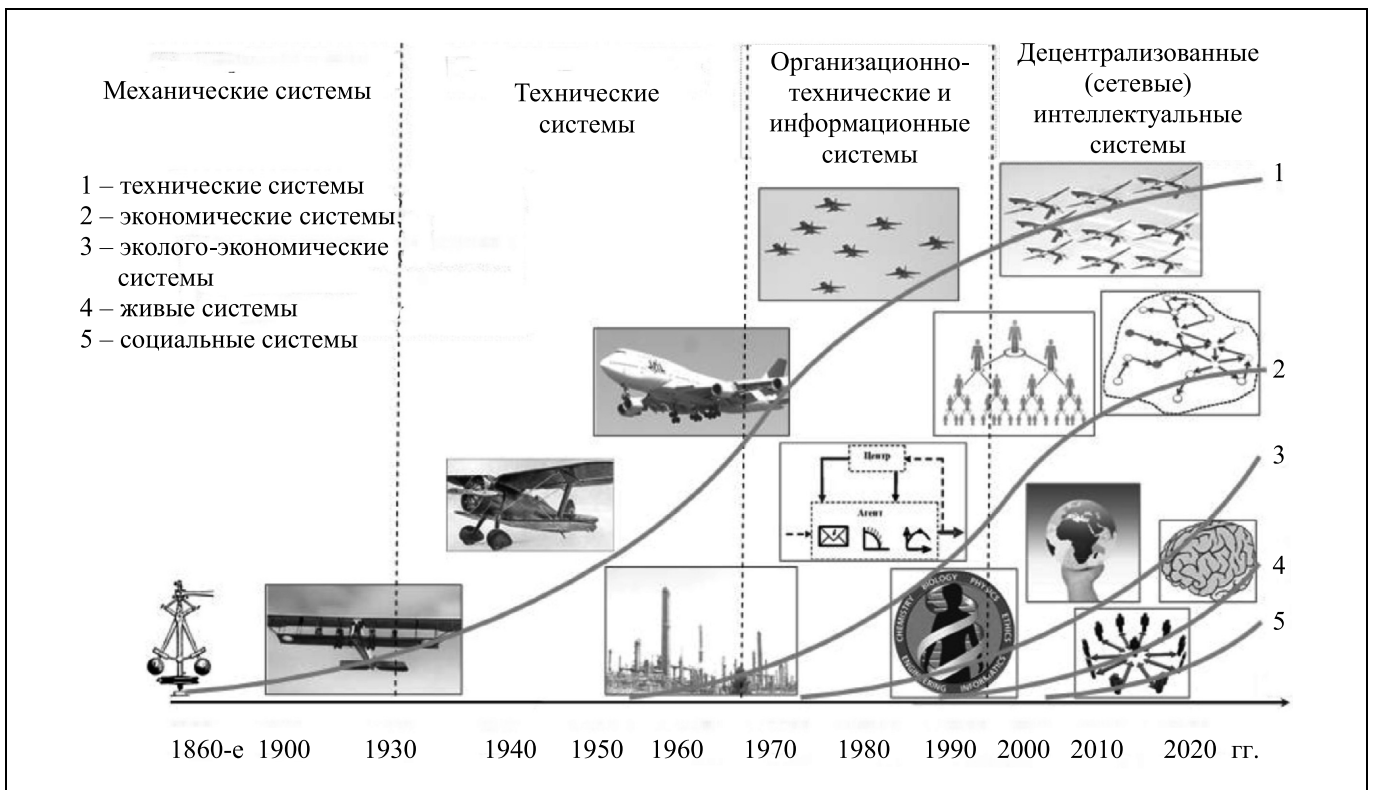


Рис. 8. Классы объектов управления

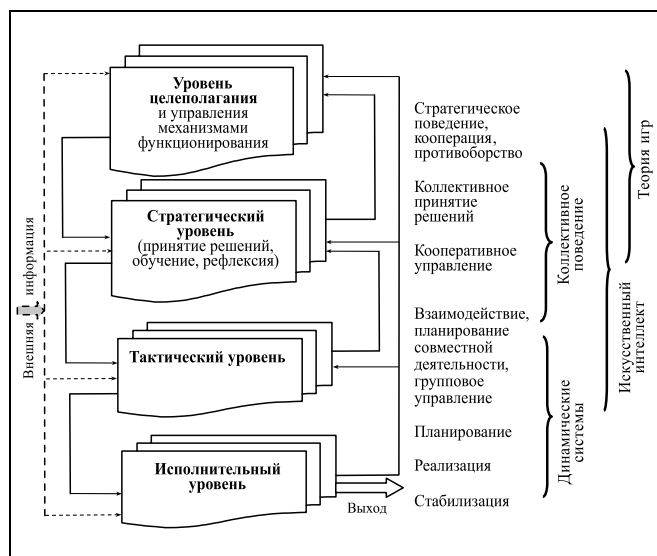


Рис. 9. Иерархическая структура задач управления

На нижнем — *исполнительном* — уровне иерархии задач управления осуществляется «реализация» выхода, например, стабилизация (быть может, адаптивная) движения по заданной траектории. На этом уровне применяется аппарат теории динамических систем и теории автоматического управления (ТАУ) (программное, позиционное, робастное или адаптивное управление).

На *тактическом уровне* осуществляется выбор планов и состояний, в том числе с учетом взаимодействия с другими автономными объектами и субъектами. Например, для задач *группового управления и кооперативного управления* (*Cooperative Control*) [26, 27] — в том числе планирования миссии — могут быть применены методы дискретной оптимизации и разнообразные средства искусственного интеллекта — нейросетевые, эволюционные, логические и др.

Стратегический уровень отвечает за принятие решений, достижение целей, обучение и рефлексию. На этом уровне, как правило, добавляется применение аппарата теории принятия решений и теории игр.

И, наконец, высший уровень (*уровень целеполагания*) соответствует принципам выбора целей и механизмов функционирования/управления.

23. Математический аппарат, применяемый для построения модели ОУ. Здесь разнообразие колоссально — например, регулярно проходят представительные конференции по использованию в задачах управления методов математической логики, случайных процессов, математической физики, исследования операций, параллельных вычислений, дискретной оптимизации и др.

24. Функциональные свойства ОУ и/или СУ, которые необходимо обеспечить: *надежность, безопасность* (включая информационную и кибербезопасность), *отказоустойчивость, живучесть, стоимость* (на всем жизненном цикле), *качество дополненной реальности, энергоэффективность, экологичность* и др.

3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Взяв за основу приведенную выше систему классификаций задач управления (см. основания классификации № 1—24, можно определить, что понимается под классической теорией управления. *Классическая теория управления* — раздел теории управления, изучающий задачи анализа и синтеза централизованного автоматического управления одним объектом [1].

«Типовая» структура учебника по ТАУ примерно такова:

- история ТАУ и примеры систем автоматического управления;
- линейные системы: операторные и частотные методы; непрерывные и дискретные системы: устойчивость, стабилизация, управляемость, наблюдаемость; неопределенность; синтез; оценивание, робастность;
- нелинейные системы; непрерывные и дискретные системы: устойчивость, стабилизация, управляемость, наблюдаемость, неопределенность; синтез;
- оптимальное управление.

В некоторых учебниках дополнительно к перечисленным четырем разделам рассматриваются стохастические системы, идентификация и адаптивные системы автоматического управления.

Современное учебное пособие по математической ТАУ [2] также в целом следует «типовой» структуре — в нем рассматриваются непрерывные и дискретные линейные системы (включая задачи оценивания и робастного управления), возмущения (ограниченные и случайные), неопределенность в описании ОУ и начальных условий; нелинейные системы, а также элементы теории оптимального управления. Оно содержит математический аппарат, адекватный современной ТАУ, — системы в пространстве состояний, технику линейных матричных неравенств, нелинейные системы, робастность, оптимальность.

Другими словами, современные учебники и справочники (см. их анализ в работах [1, 2, 14]) достаточно полно охватывают классическую теорию управления, но практически не затрагивают другие постановки задач управления и почти не рассматривают интеллектуальное управление, децентрализованное/распределенное управление, сетевое



Рис. 10. Структуризация глав учебного пособия [1]

управление и управление многоагентными и киберфизическими системами, с учетом современных технологических тенденций и возможностей машинного обучения, стратегическое поведение субъектов управляемых систем и др.

Учебное пособие [1] представляет собой попытку восполнить этот пробел в учебно-методическом обеспечении преподавания теории управления в вузах и в аспирантуре. Его цель заключается в расширении кругозора студентов магистратуры и аспирантов, уже освоивших ТАУ по классическим учебникам (например, [28, 29]) в бакалавриате, а затем — в объеме учебного пособия [2] — в магистратуре, т. е. дать им общее представление о многообразии задач и направлений современной теории управления.

Далее кратко описана структура (главы и параграфы) учебного пособия [1] и приведены ссылки на основные монографии и учебники по соответствующим направлениям современной теории управления.

Имея приведенное выше описание «классической теории управления» и систему классификаций систем управления (см. табл. 3), можно сказать, что на сегодня «дополнительными» по отношению к классической теории управления являются такие свойства систем управления, как: многоэлементность, функционирование в условиях неопределенности, существенное применение моделей ОУ и внешней среды и знаний о них, адаптивность, распределенность (управляющих и/или управляемых систем), сетевая структура коммуникаций и стратегическое поведение элементов.

Перечисленные свойства можно структурировать, в том числе условно выделив такие ключевые категории: *неопределенность*, *оптимизация*, *распределенность и сети*, *искусственный интеллект* и *стратегическое поведение* (рис. 10), каждой из которых в учебном пособии [1] отведена отдельная глава.

Глава 1. «Неопределенность» (Uncertainty). Рассмотрены системы, основанные на моделях (рис. 4), использующих оценивание/наблюдателей, идентификацию и адаптацию. В их числе стохастические системы (§ 1.1), адаптивные системы (§ 1.2), идентификация систем управления (§ 1.3), управление с итеративным обучением (§ 1.4).

§ 1.1. «Стохастические системы» (Stochastic Systems) [30, 31] посвящен динамическим системам, эволюция вектора состояния которых в дискретном времени зависит от воздействия *случайных факторов*, которые могут влиять как на сам объект, так и на получаемую информацию о его состоянии. Рассмотрена линейно-квадратичная задача *стохастического управления по неполным данным*, значительное внимание уделено оптимальной *фильтрации* (выделению полезного сигнала на фоне шума) и *управлению наблюдениями*.

§ 1.2. «Системы адаптивного управления» (Adaptive Control Systems [32, 33]). Рассмотрены адаптивные системы с идентификатором, системы с эталонной моделью, а также методы синтеза неявной эталонной модели, основанные на H_∞ -оптимизации.

§ 1.3. «Идентификация систем управления» (Identification of Control Systems). Дан анализ истории развития и современного состояния теории идентификации [34–36]. В числе современных методов приведено *усовершенствованное управление* (APC — Advanced Process Control) — управление распределенными системами/технологическими процессами, использующее *управление с прогнозирующей моделью* (MPC — Model Predictive Control). Основная идея MPC заключается в том, что в каждый момент времени с учетом всей имеющейся (об ОУ и внешней среде) информации с помощью модели ОУ (см. рис. 4) рассчитывается оптимальное программное управление на несколько последующих шагов, затем реализуется управляющее воздействие, соответствующее первому(-ым) шагу(-ам), после чего цикл повторяется [37, 38].

§ 1.4. «Управление с итеративным обучением» (Iterative Learning Control [39, 40]) посвящен моделям улучшения переходных характеристик систем, работающих в *повторяющемся режиме*, что удается достичь благодаря накоплению и запоминанию информации о реализованном процессе, которая затем используется на следующем шаге. Запоминание предыдущих действий, позволяющее на очередном шаге внести коррективы и улучшить результат, отличает данный вид управления от управления с обратной связью и от адаптивного управления, использующих текущие значения состояния управляемой системы. Поэтому *управление с итеративным обучением* можно рассматривать и как интеллектуальное.

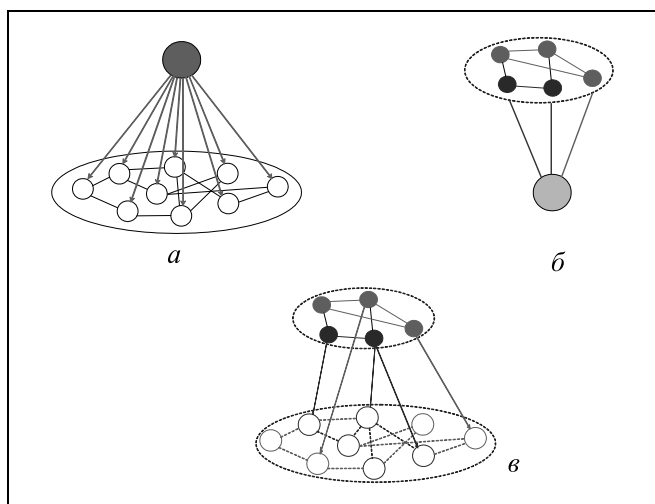


Рис. 11. Централизованное (веерная структура) (а), децентрализованное (б) и распределенное (в) управления

Глава 2. «Оптимизация» (Optimization). Обсуждены три направления теории оптимизации, тесно связанные с управлением: оптимизация в задачах большой размерности, распределенная оптимизация и невыпуклая оптимизация.

§ 2.1. «Оптимизация в задачах большой размерности» (Large-Scale Optimization). Описаны наиболее распространенные алгоритмы *выпуклой оптимизации*, рассмотрены особенности их применения к решению задач большой размерности. В качестве примеров рассмотрены задачи *оптимального управления* и задачи *фильтрации*. Дан краткий обзор наиболее распространенных программных средств оптимизации.

§ 2.2. «Распределенная оптимизация» (Distributed Optimization). Основная идея *распределенной оптимизации* заключается в следующем: задача поиска экстремума функции многих переменных декомпозируется на ряд подзадач, решаемых отдельными агентами (программными или физическими) в условиях ограниченной информации. Например, каждый из агентов «отвечает» за свою переменную и на очередном шаге выбирает ее значение, зная предыдущие выборы некоторых своих «соседей» (коммуникации между агентами имеют сетевую структуру) и стремясь максимизировать свою локальную «целевую функцию». Задача заключается в том, чтобы по заданной исходной функции найти «целевые функции» агентов и такие правила/структуру их взаимодействия, чтобы автономное поведение агентов приводило к реализации централизованного оптимума (в *алгоритмической/вычислительной теории игр* [41] соответствующего, например, равновесию Нэша игры агентов или эффективному по Парето их состоянию).

§ 2.3. «Невыпуклая оптимизация». Если задачи выпуклой оптимизации давно стали массово применяться в теории управления (см. [42, 43]), то интерес к задачам *невыпуклой оптимизации* активно растет, в том числе в связи с задачами классификации и задачами обучения искусственных нейронных сетей. Основное внимание уделено проекционным методам и выделению тех классов невыпуклых объектов, для которых эти методы дают хорошие результаты. Подробно проанализировано свойство *проксимальной гладкости* множеств, позволяющее в ряде случаев отказаться от выпуклости без особых потерь.

Глава 3. «Распределенность и сети» (Networks). Распределенность в «пространстве» может относиться к:

- одному объекту управления (модели управления *системами с распределенными параметрами* рассматриваются в § 3.1) — см. п. 12 классификации;

- нескольким взаимосвязанным автономным объектам управления (Control of Network); пример — *многоагентные системы*, характеризующиеся сетевой структурой ОУ, которые рассматриваются в § 3.2, — см. п. 10 классификации;

- управляющим системам: *децентрализованное* (при одном ОУ⁶) и *распределенное* (при нескольких ОУ) *управление* — см. п. 15 классификации и рис. 11.

Кроме того, связи управляющих и управляемых систем (*сетевое управление*⁷ рассматривается в разделе 3.3) также могут быть «распределенными», т. е. сетевыми (обмен информацией между управляющей и управляемой системой осуществляется через информационно-коммуникационную сеть) — см. п. 16 классификации в § 1 и рис. 12.

Одна из глобальных тенденций последних двадцати лет состоит в переходе от *централизованного управления*, когда одна управляющая система управляет каждой из управляемых систем (*веерная структура СУ*) и взаимодействием между ними, сначала к *децентрализации системы управления* (над сетью взаимодействующих управляемых систем — см. модели *многоагентных систем* в § 3.2 — надстраивается распределенная система управления), а затем к осуществлению *коммуникаций* меж-

⁶ Примером служат матричные структуры организационного управления, в которых у одного подчиненного может быть несколько руководителей [5].

⁷ Подчеркнем, что русскоязычный термин «сетевое управление» в литературе употребляется в двух смыслах. Первый — «управление сетью» (Control of Network), в первую очередь, сетью взаимосвязанных и взаимодействующих автономных агентов (см. § 3.2). Второй — «управление через сеть» (Networked Control, см. § 3.3).

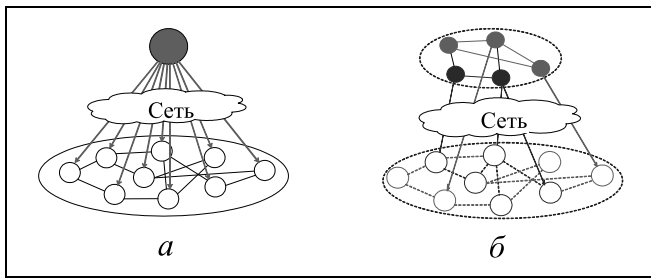


Рис. 12. Централизованное (а) и распределенное (б) сетевые управления

ду управляющими и управляемыми системами через сеть (рис. 12).

Таким образом, распределенность и «сетевизм» сегодня могут иметь место и в управляемой системе, и в управляющей, и во взаимодействии между ними [14, 44]. Более того, зачастую управляющая система оказывается «погруженной» в объект управления, в результате получается единая (быть может, с внутренней «иерархической» структурой) сеть взаимодействующих агентов.

В настоящее время происходит переход от так называемой парадигмы «си в кубе» (C^3), когда совместно решаются задачи управления, вычислений и связи (Control + Computations + Communications) — см. § 3.3, к концепции «си в пятой» (C^5) — Control + Computations + Communications + Costs + lifeCycle, когда упомянутые задачи должны решаться в комплексе с учетом стоимостных (в широком смысле) аспектов на протяжении всего жизненного цикла рассматриваемой системы, включая в том числе этап совместного проектирования управляющей и управляемой систем [14].

§ 3.1. «Системы с распределенными параметрами» (Distributed Parameter Systems) [45, 46] посвящен задачам управления системами, поведение которых описывается дифференциальными уравнениями в частных производных. Рассмотрены различные типы управления такими системами: управление граничными условиями, подвижное управление, управление с помощью точечных воздействий, распределенное управление. Приведены примеры управления колебаниями, нагревом, распространением ограниченного звукового пучка, управления фильтрационными потоками, а также управления разработкой нефтяных месторождений.

§ 3.2. «Сетевые многоагентные системы» (Multi-Agent Systems) [47—50] отражает тематику управления сетями взаимодействующих автономных агентов. Рассмотрены базовые модели асимптотического консенсуса, критерии достижимости которого формулируются в теоретико-графовых терминах свойств матриц коммуникаций между

агентами. Содержательными интерпретациями служат: сходимости мнений экспертов, координация взаимодействия мобильных роботов, синхронизация колебательных процессов (например, в электроэнергетических сетях), самоорганизация сетей связи и др.

§ 3.3. «Сетевые системы управления» (Networked Control). *Сетевое управление* — управление распределенной (состоящей из нескольких ОУ) системой одной или несколькими управляющими системами (Distributed Control), при котором связь между управляемыми и управляющими подсистемами осуществляется через информационно-коммуникационную сеть [44, 51—53]. Наличие этой сети, с одной стороны, повышает надежность, отказоустойчивость, декомпозируемость системы управления. С другой стороны, необходимо принимать во внимание и включать в ее модель такие факторы: ограниченную пропускную способность (в условиях дискретизации сигналов по времени и уровню каналов связи; запаздывание/задержку и возможную потерю пакетов информации; безопасность сети; архитектуру системы, учитывающую «распределенность» системы управления.

Глава 4. «Интеллектуальное управление» (Intelligent Control) включает три раздела, посвящена системам с переключениями, нечетким системам управления и искусственным нейронным сетям в системах управления.

§ 4.1. «Системы с переключениями» (Switched Systems). Многие системы, встречающиеся на практике, характеризуются неоднородной динамикой (см., в том числе, системы с переменной структурой [6, 54]). Системы, в которых непрерывная динамика взаимодействует с дискретными событиями, обычно называют гибридными. Дискретные события могут представлять собой просто переключения непрерывной динамики из определенного класса: детерминированные или случайные, зависящие от времени и/или состояния системы или нет и др. Такие системы называются системами с переключениями [55, 56]. Переключения могут осуществляться и некоторой системой более высокого уровня (см. рис. 9), например, экспертной системой на основе правил логического вывода [9]. Именно поэтому данный параграф условно помещен в главу, посвященную интеллектуальному управлению.

Существенное внимание исследователей при изучении гибридных динамических систем уделяется их устойчивости, в том числе задачам об устойчивости при произвольных переключениях; о максимальной частоте переключений, сохраняющей устойчивость; о стабилизации системы в целом благодаря применению закона переключений между составляющими подсистемами и др.

§ 4.2. «Нечеткие системы управления» (Fuzzy Control Systems). Одно из массовых направлений в интеллектуальном управлении представляет такая область, как применение аппарата *нечетких множеств* при формализации плохо структурированных и субъективных знаний о сложных управляемых системах (наибольший опыт накоплен в задачах синтеза *нечетких регуляторов* для управления *технологическими процессами* и установками) [8, 57—59]. Рассмотрены логико-лингвистические, аналитические, ПИД-, обучаемые и гибридные нечеткие регуляторы, обсуждены их свойства, преимущества и недостатки.

§ 4.3. «Искусственные нейронные сети» (Artificial Neural Networks). Управление с помощью *искусственных нейронных сетей* уже несколько десятилетий представляет собой, наверное, наиболее обширный раздел интеллектуального управления [11, 59]. Рассмотрена эволюция этого научного направления, отражены современные высокоэффективные подходы *глубокого обучения*.

Глава 5. «Стратегическое поведение» (Strategic Behavior) посвящена рассмотрению дифференциальных, кооперативных, а также иерархических и рефлексивных игр, отражающих различные аспекты управления системами, элементы которых способны к стратегическому поведению.

§ 5.1. «Дифференциальные игры» (Differential Games). В отличие от задач *оптимального управления*, в *дифференциальной игре* цели игроков противоположны, и каждый из игроков принимает решение о своем векторе управлений, от которых зависит эволюция состояния системы, описываемая дифференциальными уравнениями или дифференциальными включениями [28, 60, 61].

Наиболее исследованы дифференциальные *игры преследования*, в которых число игроков равно двум, одного из них называют *догоняющим*, другого *убегающим*. Цель догоняющего: приведение вектора состояния системы на заданное множество за минимальное время; цель убегающего — по возможности отложить этот момент.

Отдельный раздел теории дифференциальных игр составляют игры с *неполной информацией*, к которым относятся *игры поиска* [62].

§ 5.2. «Кооперативные игры» (Cooperative Games). При рассмотрении *конфликтно-управляемых процессов*, развивающихся во времени, возникает новая проблема — *динамической устойчивости* или *состоятельности во времени* выбранных на основе того или иного принципа оптимальности решений, принимаемых игроками, осуществляющими управление динамической системой. Эта проблема состоит в том, что решение, найденное в начале игры на основе согласованного участниками *конфликтно-управляемого процесса* *принципа опти-*

мальности, может оказаться не удовлетворяющим этому принципу в процессе реализации выбранного решения. Рассмотрены вопросы, связанные с построением различных принципов оптимальности в динамических и дифференциальных играх и описано решение проблемы динамической устойчивости (состоятельности во времени) решений, порожденных тем или иным принципом оптимальности [18, 63, 64].

§ 5.3. «Иерархические и рефлексивные игры» (Hierarchical and Reflexive Games). *Теория игр* изучает модели взаимодействия рациональных (принимающих решения самостоятельно, в соответствии с собственными предпочтениями) агентов [19—21]. Для нее традиционна схема, когда сначала описывается «модель игры»; затем выбирается концепция *равновесия*, определяющая, что понимается под устойчивым исходом игры; после чего может формулироваться та или иная задача управления — выбора значений управляемых «параметров игры», приводящих к реализации требуемого равновесия [5, 22].

В *иерархических играх* управление присутствует в явном виде — как действие или стратегия игрока, делающего первый ход.

Рефлексивные игры представляют собой адекватный и удобный аппарат описания и решения задач *информационного управления* — воздействия на информированность субъектов с целью побуждения их к принятию требуемых решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Любая система классификации задач внутри некоторой обширной и, главное, активно развивающейся науки, конечно, уязвима для потенциальной критики (например, каково основание классификации оснований классификации) и достаточно быстро устаревает. Тем не менее, любая классификация полезна, так как, помимо упорядочения, позволяет выявить и «белые пятна» — комбинации значений признаков классификации, не привлекая пока должного внимания исследователей.

В заключение отметим, что вне рассмотрения выше и в учебном пособии [1] остались отмеченные в п. 20—24 классификации систем управления: *средства управления*, природа и «*отраслевая*» специфика объектов управления, а также *функциональные свойства СУ и ОУ*. Кроме того, почти не рассмотрены *киберфизические системы* [65, 66], *человеко-машинные (эргатические) системы*, *многоуровневые СУ* и проблематика управления *жизненными циклами* сложных систем [4]. Также представляло бы интерес систематическое и регу-



лярное рассмотрение перспектив практического применения тех или иных теоретических результатов, одним из примеров которого может служить экспертный опрос, результаты которого приведены в [67].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Теория управления* (дополнительные главы): учеб. пособие / под ред. Д.А. Новикова. — М.: Ленанд, 2019. — 552 с. [Teoriya upravleniya (dopolnitel'nye glavy): ucheb. posobie / pod red. D.A. Novikova. — M.: Lenand, 2019. — 552 s. (In Russian)]
2. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления. — М.: Ленанд, 2019. — 504 с. [Polyak, B.T., Khlebnikov, M.V., Rapoport, L.B. Matematicheskaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya. — M.: Lenand, 2019. — 504 s. (In Russian)]
3. Новиков Д.А. Методология управления. — М.: ЛИБРОКОМ, 2011. — 128 с. [Novikov, D.A. Control Methodology. — N.Y. Nova Science Publishers, 2013. — 76 p.]
4. Белов М.В., Новиков Д.А. Методология комплексной деятельности. — М.: Ленанд, 2018. — 320 с. [Belov, M.V., Novikov, D.A. Metodologiya kompleksnoi deyatel'nosti. — M.: Lenand, 2018. — 320 s. (In Russian)]
5. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. — М.: Физматлит, 2012. — 604 с. [Novikov, D.A. Theory of Control in Organizations. — New York: Nova Science Publishers, 2013. — 341 p.]
6. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи. Управление при неопределенности. — М.: Наука, 1997. — 352 с. [Emel'yanov, S.V., Korovin, S.K. Noveye tipy obratnoi svyazi. Upravlenie pri neopredelennosti. — M.: Nauka, 1997. — 352 s. (In Russian)]
7. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунев Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с. [Vasil'ev, S.N., Zherlov, A.K., Fedosov, E.A., Fedunov, B.E. Intellectnoye upravlenie dinamicheskimi sistemami. — M.: Fizmatlit, 2000. — 352 s. (In Russian)]
8. Пантелеев А.В., Бортакровский А.С. Теория управления в примерах и задачах. — М.: Высшая школа, 2003. — 583 с. [Panteleev, A.V., Bortakovskii, A.S. Teoriya upravleniya v primerakh i zadachakh. — M.: Vysshaya shkola, 2003. — 583 s. (In Russian)]
9. Месарович М., Мако Д., Такахага И. Теория иерархических многоуровневых систем. — М.: Мир, 1973. — 344 с. [Mesarović, M., Mako, D., Takahara, Y. Theory of Hierarchical Multilevel Systems. — New York: Academic, 1970. — 294 p.]
10. Вапник В.Н., Червоненко А.Я. Теория распознавания образов. — М.: Наука, 1974. — 416 с. [Vapnik, V.N., Chervonenkis, A.Ya. Teoriya raspoznavaniya obrazov. — M.: Nauka, 1974. — 416 s. (In Russian)]
11. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. — М.: Машиностроение, 2009. — 392 с. [Vasil'ev, V.I., Ilyasov, B.G. Intellectual'nye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika. — M.: Mashinostroenie, 2009. — 392 s. (In Russian)]
12. Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. — М.: Физматлит, 2001. — 576 с. [Intellectual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya / pod red. I.M. Makarova, V.M. Loxhina. — M.: Fizmatlit, 2001. — 576 s. (In Russian)]
13. Liu, J. Intelligent Control Design and Matlab Simulation. — Singapore: Springer, 2017. — 294 p.
14. Новиков Д.А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. — М.: Ленанд, 2016. — 160 с. [Novikov, D.A. Cybernetics: from Past to Future. — Heidelberg: Springer, 2016. — 107 p.]
15. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. — М.: Логос, 2000. — 296 с. [Larichev, O.I. Teoriya i metody prinyatiya reshenii. — M.: Logos, 2000. — 296 s. (In Russian)]
16. Орлов А.И. Теория принятия решений. — М.: Экзамэн, 2005. — 656 с. [Orlov, A.I. Teoriya prinyatiya reshenii. — M.: Ehkzamen, 2005. — 656 s. (In Russian)]
17. Рыков А.С. Модели и методы системного анализа: принятие решений и оптимизация. — М.: МИСИС, 2005. — 352 с. [Rykov, A.S. Modeli i metody sistemnogo analiza: prinyatie reshenii i optimizatsiya. — M.: MISIS, 2005. — 352 s. (In Russian)]
18. Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Шевкопляс Е.В. Теория игр. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 432 с. [Petrosyan, L.A., Zenkevich, N.A., Shevkopyas, E.V. Teoriya igr. — SPB.: BKHV-Peterburg, 2012. — 432 s. (In Russian)]
19. Fudenberg, D., Tirole, J. Game Theory. — Cambridge: MIT Press, 1995. — 579 p.
20. Maschler, M., Solan, E., Zamir, S. Game Theory. — Cambridge: Cambridge University Press, 2013. — 1008 p.
21. Myerson, R. Game Theory: Analysis of Conflict. — London: Harvard Univ. Press, 1991. — 568 p.
22. Гермеиер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. — М.: Наука, 1976. — 327 с. [Germeier, Yu. Non-Antagonistic Games, 1976. — Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1986. — 331 p.]
23. Maxwell, J.C. On Governors // Proc. of the Royal Society of London. — 1868. — Vol. 16. — P. 270–283.
24. Вышнеградский И.А. О регуляторах прямого действия // Известия СПб. практического технологического института. — 1877. — Т. 1. — С. 21–62. [Vyshnegradskii, I.A. O regulyatorakh pryamogo deistviya // Izvestiya SPB. prakticheskogo tekhnologicheskogo instituta. — 1877. — T. 1. — S. 21–62. (In Russian)]
25. The Control Handbook / Ed. by W. Levine. — NY.: CRC Press, 2010. — Vol. I–III. — 3526 p.
26. Калыев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. — М.: Физматлит, 2009. — 280 с. [Kalyaev, I.A., Gaiduk, A.R., Kapustyayn, S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov. — M.: Fizmatlit, 2009. — 280 s. (In Russian)]
27. Cooperative Control and Optimization / Ed. by R. Murphey, P. Pardalos. — Dordrecht: Kluwer, 2002. — 303 p.
28. Ким Д.П. Теория автоматического управления: 2-е изд. — М.: Физматлит, 2007. — Т. 1: Линейные системы. — 310 с.; т. 2: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. — 440 с. [Kim, D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: 2-e izd. — M.: Fizmatlit, 2007. — T. 1: Lineinye sistemy. — 310 s.; T. 2: Mnogomernye, nelineinye, optimal'nye i adaptivnyye sistemy. — 440 s. (In Russian)]
29. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. — М.: Наука, 1986. — 616 с. [Pervozvanskii, A.A. Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya. — M.: Nauka, 1986. — 616 s. (In Russian)]
30. Kumar, P., Varaiya, P. Stochastic Systems: Estimation, Identification, and Adaptive Control. — NY.: SIAM, 2015. — 376 p.
31. Speyer, J., Chung, W. Stochastic Processes, Estimation and Control. — NY.: SIAM, 2008. — 400 p.
32. Astrom, K., Wittenmark, B. Adaptive Control. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 1994. — 574 p.
33. Ioannou, P., Sun, J. Robust Adaptive Control. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. — 821 p.
34. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. — 553 с. [Feldbaum, A.A. Osnovy teorii optimal'nykh avtomaticheskikh sistem. — M.: Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 1963. — 553 s. (In Russian)]
35. Keesman, K. System Identification: An Introduction. — Heidelberg: Springer, 2011. — 323 p.

36. *Tangirala, A.* Principles of System Identification: Theory and Practice. — Boca Raton: CRC Press, 2014. — 908 p.
37. *Rawlings, J., Mayne, D., Diehl, V.* Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. — Madison: Nob Hill Publishing, 2017. — 770 p.
38. *Wang, L.* Model Predictive Control System Design and Implementation Using Matlab. — Berlin: Springer, 2009. — 378 p.
39. *Owens, D.* Iterative Learning Control. An Optimization Paradigm. — London: Springer, 2016. — 456 p.
40. *Sutton, R., Barto, A.* Reinforcement Learning: An Introduction. — Cambridge: The MIT Press, 2017. — 427 p.
41. *Algorithmic Game Theory* / Eds. N. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos, V. Vazirani. — NY.: Cambridge University Press, 2009. — 776 p.
42. *Нестеров Ю.Е.* Методы выпуклой оптимизации. — М.: МЦНМО, 2010. — 281 с. [*Nesterov, Yu.E.* Metody vypukloj optimizatsii. — М.: MTSNMO, 2010. — 281 s. (In Russian)]
43. *Поляк Б.Т.* Введение в оптимизацию. — М.: Ленанд, 2014. — 392 с. [*Polyak, B.T.* Vvedenie v optimizatsiyu. — М.: Lenand, 2014. — 392 s. (In Russian)]
44. *Проблемы сетевого управления* / под ред. А.Л. Фрадкова. — Ижевск: ИКИ, 2015. — 391 с. [*Problemy setevogo upravleniya* / pod. red. A.L. Fradkova. — Izhevsk: IKI, 2015. — 391 s. (In Russian)]
45. *Aziz, A., Wintage, J., Balaz, M.* Control Theory of Systems Governed by Partial Differential Equations. — NY.: Academic Press, 1977. — 278 p.
46. *Lasićka, I.* Mathematical Control Theory of Coupled PDEs. — Charlottesville: SIAM, 2002. — 242 p.
47. *Ren, W., Yongcan, C.* Distributed Coordination of Multi-agent Networks. — London: Springer, 2011. — 307 p.
48. *Shoham, Y., Leyton-Brown, K.* Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations. — Cambridge: Cambridge University Press, 2008. — 504 p.
49. *Wooldridge, M.* An Introduction to Multi-Agent Systems. — NY.: John Wiley and Sons, 2002. — 376 p.
50. *Yu, W., Wen, G., Chen, G., Cao, J.* Distributed Cooperative Control of Multi-agent Systems. — NY.: Wiley, 2017. — 350 p.
51. *Matveev, A., Savkin, A.* Estimation and Control over Communication Networks. — Boston: Birkhauser, 2009. — 533 p.
52. *Networked Embedded Systems Handbook* / Ed. by R. Zurawski. — Boca Raton: CRC Press, 2009. — 837 p.
53. *You, K., Xiao, N., Xie, L.* Analysis and Design of Networked Control Systems. — Heidelberg: Springer, 2015. — 321 p.
54. *Емельянов С.В.* Системы автоматического управления с переменной структурой. — М.: Наука, 1967. — 336 с. [*Emel'yanov, S.V.* Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoi strukturoi. — М.: Nauka, 1967. — 336 s. (In Russian)]
55. *Liberzon, D.* Switching in Systems and Control. — Boston: Birkhauser, 2003. — 233 p.
56. *Schaft, A., Schumacher, H.* An Introduction to Hybrid Dynamical Systems. — Heidelberg: Springer, 2000. — 174 p.
57. *Кудинов Ю.И., Келина А.Ю., Кудинов И.Ю.* и др. Нечеткие модели и системы управления. — М.: Ленанд, 2017. — 328 с. [*Kudinov, Yu.I., Kelina, A.Yu., Kudinov, I.Yu.* i dr. Nchetkie modeli i sistemy upravleniya. — М.: Lenand, 2017. — 328 s. (In Russian)]
58. *Кудинов Ю.И., Пащенко Ф.Ф.* Теория автоматического управления (с использованием Matlab-Simulink). — СПб.: Лань, 2018. — 312 с. [*Kudinov, Yu.I., Pashchenko, F.F.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (s ispol'zovaniem Matlab-Simulink). — SPB.: Lan', 2018. — 312 s. (In Russian)]
59. *Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 452 с. [*Rutkovskaya, D., Piliński, M., Rutkovskii, L.* Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. — М.: Goryachaya liniya — Telekom, 2006. — 452 s. (In Russian)]
60. *Красовский Н.Н., Субботин А.И.* Позиционные дифференциальные игры. — М.: Физматлит, 1974. — 456 с. [*Krasovskii, N.N., Subbotin, A.I.* Pozitsionnye differentsial'nye igry. — М.: Fizmatlit, 1974. — 456 s. (In Russian)]
61. *Isaacs, R.* Differential Games: A Mathematical Theory with Applications to Warfare and Pursuit, Control and Optimization. — Dover: Dover Publications, 1999. — 416 p.
62. *Петросян Л.А., Гарнаев А.Ю.* Игры поиска. — СПб.: СПбГУ, 1992. — 216 с. [*Petrosyan, L.A., Garnaev, A.Yu.* Igy poiska. — SPB.: SPBGU, 1992. — 216 s. (In Russian)]
63. *Yeung, D., Petrosjan, L.* Cooperative Stochastic Differential Games. — Heidelberg: Springer, 2006. — 242 p.
64. *Yeung, D., Petrosjan, L.* Subgame Consistent Cooperation. — Heidelberg: Springer, 2016. — 520 p.
65. *Cyber-Physical Systems: Foundations, Principles and Applications* / Ed. by H. Song, D. Rawat, S. Jeschke, C. Brecher. — NY.: Academic Press, 2017. — 514 p.
66. *Rajeev, A.* Principles of Cyber-Physical Systems. — Massachusetts: The MIT Press, 2017. — 459 p.
67. *IFAC Newsletter.* — April 2019.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.С. Манделем.

Поступила в редакцию 22.04.2019,
принята к публикации 10.05.2019.

Новиков Дмитрий Александрович — чл.-корр. РАН,
✉ novikov@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

CONTROL SYSTEMS CLASSIFICATION

D.A. Novikov

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ novikov@ipu.ru

Abstract. Control systems classifications are considered to be built on the basis of: type, target and design of control, control object (CO) model, time, CO properties change over time, dimensions of inputs and outputs, disturbances, uncertainty, number of CO, ability to adopt to changes, state of distribution of a single CO, CO structure, number of control systems (CS), CS structure, connections between control and controllable systems, CO autonomy, knowledge use, manifestations of strategic behavior. As additional classification categories, it is suggested to base on: control means, nature and «sectoral» specifics of CO, and functional properties of CO and CS as well.

Keywords: control system, control object model, uncertainty, structure, optimization, strategic behavior.