

ЧАСТЬ III. РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

В предыдущих главах этой книги неоднократно отмечалась способность «живых частиц» и образуемых ими систем к автономной обработке информации и ее использованию для достижения некоторых собственных целей – то есть *интеллект* в широком смысле данного весьма расплывчатого понятия. В квазифизических моделях эту особенность социальных систем учитывают косвенно: через виртуальные силы социального поля (глава 5), введением графов и сетей, где ребра или дуги отвечают взаимодействиям между агентами (главы 6, 8 и 9), стремлением агентов и мультиагентных систем к максимуму абстрактной полезности (главы 7 и 8) и др. Во всех случаях *целеполагание* агентов, как одно из важнейших проявлений интеллекта, принимается как эмпирический факт, выраженный формулами – нередко произвольными либо заимствованными из курсов физики. Почти на таком же эмпирическом уровне в теории игр (глава 7) «исчисляются» стратегии взаимодействующих сторон: сами по себе они безусловно выработаны с участием интеллекта, но их фиксированный набор задается в начальных условиях для нахождения стратегии или комбинации стратегий, наилучшей по некоторому параметру – снова полезности в той или иной форме. Возникновение новых, или *эмерджентных*, качеств системы (англ. *emergent*: спонтанно возникающий, рождающийся) – роение пчел, круговая оборона копытных при появлении хищника, модернизация производства на предприятии и многие другие хорошо известные явления – такими расчетами не воспроизводятся: выбираемые стратегии должны быть изначально «заложены» в модель.

В этой, последней части книги будут обсуждаться такие формальные схемы описания социальных систем, где интеллект непосредственно учитывается или моделируется. В 10-й главе мы дадим рабочее определение интеллекта и обсудим его простейшие «кооперативные» проявления в биологических системах, частично уже рассмотренные в гл. 5. Здесь же будут представлены основные положения инженерной *теории автоматического управления (ТАУ)*, задающей динамику автономных технических устройств, и используемый в ней инструмент свертки, или «сжатия», информации: *нечеткие множества*. В главе 11 мы кратко рассмотрим современные версии искусственного интеллекта (ИИ): искусственные нейронные сети и схемы, основанные на математической логике (для чего понадобится знакомство с ее основными понятиями), а также виды распределенного интеллекта (РИ) в разных социальных системах и методы его компьютерной имитации. В 12-й главе будут обсуждаться возможности синтеза качественных представлений об интеллекте (как индивидуальном, так и коллективном) с положениями ТАУ, которые позволяют анализировать структуру образов физической реальности в *пространстве представлений*, открывая путь к полноценному моделированию работы человеческого ума. Как и во всех предыдущих главах, наше изложение иллюстрируют примеры социальных систем и процессов – особенно таких, где словосочетание «коллективный разум» имеет определенное положительное содержание.

Прежде чем обсуждать коллективный интеллект, необходимо охарактеризовать его носителя: *социальные системы*. Общее определение «социальная система – это динамическая совокупность автономных взаимодействующих индивидов» было дано во

Введении, далее «социальные» характеристики разных мультиагентных систем использовались как общеизвестные термины с интуитивно понятным содержанием. Постараемся его детализировать.

Мультиагентной социальной системой (МСС) мы будем называть динамическую совокупность автономных агентов, которые в процессе своей деятельности воспринимают информацию, взаимодействуя с внешней средой и с другими агентами. Взаимодействия и взаимосвязи агентов могут быть сложными и многоуровневыми: они не исчерпываются связями хищника с его кормовой базой (см. модель Лотки-Вольтерра в гл. 4) и всегда включают обмен информацией. Биологические существа одного вида (пчелы, приматы, люди) составляют социальную систему в узком смысле слова. «Неживые» программируемые агенты с взаимосвязанной динамикой (роботы, беспилотные аппараты) образуют *искусственную МСС*.

Автономность агентов в МСС предполагает наличие у них собственных целей. В большинстве систем цели индивидов определяются их биологической природой и социальной (системной) функцией, но для взаимодействующих технических устройств (или, например, армейского подразделения) цель задается извне. Индивидуальные агенты (сообщество живых организмов, автомобили на шоссе и т.д.) составляют *МСС 1-го уровня*. Взаимодействующие МСС (экономические субъекты, организационные системы, политические партии) сами могут выступать в роли агентов в системах более высокого уровня.

Методы и приемы математического моделирования МСС различной природы, в том числе перенесенные из физики, рассматривались во всех предыдущих главах. В большинстве таких моделей обработку и использование информации индивидами учитывают косвенно: введением виртуальных потенциалов отталкивания движущихся агентов от препятствий и их притяжения к целям, стремлением агентов к максимуму полезности и другими формальными приемами. Этот подход позволяет воспроизводить и предсказывать динамику многих МСС (например, транспортных потоков, гл. 5) на коротких горизонтах прогнозирования. В общем же случае модели, основанные на балансе изначально заданных факторов (включая выигрыши, влияния, интересы) и поиске максимума энергоподобной целевой функции при воздействии случайных помех («шума») дают лишь качественное описание, или *имитацию*, реальных общественных систем и процессов.

Фундаментальной характеристикой МСС, не воспроизводимой в стандартных квазифизических моделях, является *распределенный интеллект (РИ)*: еще одно общеизвестное понятие, которое мы далее постараемся детализировать. Из-за наличия РИ динамика социальной системы не сводится к простой сумме динамик ее агентов: она включает «эмерджентные» явления – в частности, системное целеполагание. В этой части будут рассмотрены проявления РИ в различных видах МСС, элементы его качественного описания в гуманитарных дисциплинах и подходы к математическому моделированию «интеллектуальных» объектов.

ГЛАВА 10. ПРОСТЕЙШИЕ ВИДЫ ИНТЕЛЛЕКТА И АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Что такое интеллект, его отличительные признаки. Общественные насекомые: осы, пчелы, муравьи, термиты. Иерархия и анархия у общественных насекомых, запись информации, роевой интеллект. «Порядок клевания» и иерархия у животных. Примеры роевого РИ, рыбы и птицы. «Разум толпы».

Определение протоинтеллекта и робот-пылесос. Признаки искусственного интеллекта (ИИ) в теории автоматического управления (ТАУ). Робототехника, фильтр Калмана. Физическое пространство состояний и информационное пространство представлений. РИ формации роботов.

Математические сведения о нечетких множествах. Нечеткие числа и функции. Свертка информации и нечеткий контроллер.

Первое удивительное обстоятельство для вступающих в область исследований интеллекта – это отсутствие его общепринятого определения. Анализом проявлений интеллекта и интеллектуальных качеств индивидуумов, индивидов и технических устройств плодотворно занимаются десятки дисциплин от информационных технологий (ИТ) до философии. Центр тяжести всей этой большой области располагается в *когнитивных науках* (англ. *cognitive science*), куда входят психология, нейрофизиология и (отдельно) *когнитивистика*, а также многие другие автономные отрасли знаний с собственными терминами, достижениями и научными школами. Неудивительно, что для английского слова *intelligence* (попросту способность думать) в русском языке имеет несколько очень разных вариантов перевода.

Главным объектом исследований и анализа в когнитивных науках, безусловно, является индивидуальный интеллект человека (*human intelligence, HI*). Однако многими авторами такой термин оспаривается как неточный – действительно, интеллект человека неотделим от общества – и слишком расплывчатый. Уровни интеллектуальной деятельности в философии (и не только в ней) принято подразделять на сознание, мышление и лишь затем разум как высшее проявление человеческого ума. И даже если, не погружаясь в споры о терминах, ограничиться интеллектом человека – в научной литературе обсуждается длинный ряд его несовпадающих характеристик: аналитические способности, умение решать задачи, эрудиция, способность к творчеству («креативность»), успешная «социализация» (т.е. умение жить в коллективе, в том числе им руководить) и многое другое.

Широко известны и иные виды индивидуального интеллекта: *animal intelligence*, в отечественной литературе осторожно называемый элементами мышления животных (в этой области есть прекрасная книга¹), *искусственный*, или машинный, *интеллект (ИИ, англ. artificial intelligence, AI*; в области его исследований и конструирования ежегодно выходит сотни тысяч новых публикаций²), комбинированные интеллектуальные системы *человек + компьютер*. Отдельно и независимо от них существуют и изучаются несколько разновидностей коллективного, или *распределенного интеллекта (РИ; англ. distributed intelligence, DI)*, который и будет основной темой в этой части. Заметим, что термином *интеллектуальный* в смысле «передовой и гибкий» нередко злоупотребляют в рекламных целях: «интеллектуальный интерфейс», «интеллектуальная парковка» и т.п. Иначе говоря, интеллект как реально существующее и интуитивно понятное явление в научной литературе отражается весьма многозначно.

Аморфность понятия «интеллект» с большим числом разных интерпретаций, безусловно, вносит неопределенность в основы обсуждаемого явления – но одновременно увеличивает свободу в его обсуждении. Общими (в некоторых источниках подразумеваемыми) качествами интеллектуальных объектов или субъектов обычно считают способность к самостоятельным действиям (автономность), взаимодействие с внешними объектами и стремление к некоторой цели – прочие признаки могут варьироваться. Подобно множеству толкований термина «общество» (см. Введение), такая неопределенность позволяет сконструировать почти любое определение интеллекта, которое не будет противоречить его эмпирически установленным характеристикам.

В большинстве описаний интеллекта человека и животных отмечается способность индивидуума или индивида – далее агента – ставить и преследовать определенную цель, используя ограниченную информацию, извлекаемую из окружающей среды. Целью, или же существенным качеством интеллектуального агента, часто называют адаптацию к изменяющимся внешним условиям. Соответственно, наше рабочее (не академическое и возможно, неказистое, но полезное) определение интеллекта, принятое в этой части книги, таково:

(10.1) *Интеллект – это способность автономного агента стремиться к определенному состоянию (цели), воспринимая, обрабатывая и используя внешнюю информацию для ее достижения.*

Термин *информация* здесь понимается не в математическом смысле (например, как изменение энтропии Шеннона, см. разд. 8.3.2 главы 8), а *наивно*: как некоторый объем сведений, извлекаемых агентом из внешних воздействий-«сигналов»*.

Весьма широкое определение (10.1) выходит за пределы объектов и процессов, традиционно относимых к проявлениям интеллекта. Ему, в частности, удовлетворяют фототропия зеленых растений и хемотаксис бактерий (см. гл. 5) – а также действия робота-пылесоса, в общепринятом смысле неинтеллектуального устройства. Однако в когнитивистской литературе два первых явления действительно относят к прототипам интеллектуальной деятельности, а в робототехнике интеллект понимают еще шире: как способность машины выполнять заданную ей программу действий в переменных, заранее не запрограммированных внешних условиях.

Мы будем пользоваться определением (10.1) именно потому, что оно не противоречит большинству существующих характеристик интеллекта и захватывает пограничные области – такие, как автоматическое управление. Благодаря широте, это определение распространяется на любые живые существа и на созданные человеком устройства (ИИ); ему удовлетворяют как индивидуальные, так и коллективные агенты (РИ). С необходимыми оговорками в том же контексте будет обсуждаться *протоинтеллект* систем автоматического управления и оснащенных ими роботов. Ниже мы увидим, что эти системы действительно проявляют такие фундаментальные качества, присущие всем видам

* Поскольку наша книга относится к учебной литературе, мы не станем принимать во внимание тонкое различие между внешними сигналами, информацией и знанием, важное для специализированных дисциплин.

интеллекта, как *отражение реальности и свертывание информации* в формальные конструкции, для интеллекта более высоких уровней называемые *образами*.

В соответствии с литературой, к главным функциям интеллекта относятся

1. создание образов реальности (*отражений*)
2. целеполагание
3. обучаемость
4. запись и свертывание внешней информации
5. создание новой информации

Как почти всегда в гуманитарных науках, эти свойства не поддаются точному разделению – например, отражение реальности (п. 1), запись информации (п. 4) и обучаемость (п. 3). Свертывание информации (п. 4), или замена больших массивов данных меньшими массивами, сохраняющими их главное содержание – единственный способ анализа внешних сигналов, параметры которых образуют континуальные множества, ограниченными средствами человеческого мозга ($\sim 10^{11}$ нейронов, см. разд. 6.2.2 главы 6) и иных материальных субстратов. Создание агентом новой информации (п. 5) в форме «эмерджентности» и «креативности» широко обсуждается на качественном уровне, но непопулярно в информационных технологиях именно потому, что существующие виды ИИ еще не умеют «придумывать новое» и самостоятельно определять свои цели – возможно, и к лучшему для нас.

К интеллекту человека примыкает большая разнородная область когнитивных способностей животных. В последние десятилетия здесь было установлено, что «ум» наиболее высокоразвитых млекопитающих (высших обезьян, дельфинов) и птиц (врановых, попугаев) по ряду параметров отличается от человеческого скорее в количественном отношении, обусловленном строением мозга и нервной системы (см.¹). Экспериментально доказаны способности таких животных к изготовлению орудий, счету, выработке образов действительности и абстрактных представлений (в частности, геометрических), а также к целенаправленному использованию *языков-посредников*. Кроме попугаев, которые могут употреблять в этом качестве до нескольких сотен слов обычного языка, молодые шимпанзе, обученные языку глухонемых (*амслену*) или специально разработанным компьютерным средствам общения (языку *иеркиши*), в исследованиях американских биологов осваивали до 2 тысяч понятий и оперировали ими на уровне человеческого ребенка в возрасте 2 – 2.5 лет.

Учитывая вариативность интеллектуальных способностей людей и животных, можно предположить отсутствие резкой границы между техническими возможностями индивидуального человеческого и не-человеческого видов интеллекта. Когнитивные способности современного *homo sapiens*, выделяющие нас из всей живой природы, не существуют вне человеческого общества, неразрывно связаны с его РИ и должны рассматриваться как составная часть интеллектуального социума. Более детально мы обсудим эту связь в главе 11.

Характерной чертой интеллекта человека и животных, связанной с решением нестандартных задач, является приход к правильному ответу путем *инсайта* («озарения») вместо последовательного логического вывода даже в тех случаях, когда такой вывод возможен и необходим (математика, точные науки). Данный механизм, вероятно, тоже

выработан Природой для компенсации ограниченной технической базы интеллекта живых существ. В случае умственной деятельности людей условиями инсайта являются возможно более широкая база знаний, концентрация индивидуума на решении задачи и *расшатывание образа*, облегчающее поиск нестандартных ответов. Подобная схема не вполне признана в когнитивных науках, но она успешно используется в творческой деятельности³: как индивидуальной, так и коллективной (см. следующую главу).

10.1. Роевой интеллект

Одной из самых интригующих областей биологии являются исследования общественных насекомых. Их адаптационные достижения (муравьи, возникшие на Земле 80-85 млн. лет назад, насчитывают более 20 тыс. видов и по биомассе намного превышают позвоночных животных, среди беспозвоночных они являются главными хищниками), сложные социальные структуры и огромное разнообразие коллективной динамики находятся в резком контрасте с весьма малыми когнитивными возможностями индивидуальных особей. Наблюдения за многочисленными параллелями деятельности муравьев и пчел с жизнью человеческого общества, начиная с античности, привели многих авторов к выводу о наличии разума у этих созданий. К настоящему времени такая гипотеза скорее принята, чем отвергнута – но с рядом принципиальных уточнений.

Научно-популярное отступление: общественные насекомые

*Кто нас поместил сюда,
таких разных?
Ты шел по тропе труда,
а мы – праздно!*
Олжас Сулейменов, «Муравей»

Разнообразные стороны жизни ос, пчел, муравьев, термитов и некоторых других общественных насекомых подробно рассмотрены в замечательной книге В.Е. Кипяткова ([1] в списке рекомендуемой литературы). Весьма сложные и изощренные нормы поведения, охоты, строительства гнезда и заботы о потомстве, отобранные эволюцией, не обязательно свидетельствуют об интеллекте насекомых. Они встречаются как у одиночных, так и у общественных видов с многочисленными промежуточными формами (например, у некоторых пауков). К «истинно общественным», или *эусоциальным*, насекомым примыкают несколько ступеней *парасоциальных* и *субсоциальных* – в частности, среди ос и пчел, где также есть и одиночные виды. Важнейшими признаками эусоциальности являются проживание в общем гнезде, как минимум, двух поколений, разделение репродуктивных функций и специализация деятельности, у высокоразвитых общественных видов приводящая к существованию *каст* со значимыми различиями формы и размеров особей: *кастовым диморфизмом* либо полиморфизмом.

На низкой ступени эусоциальности находятся знакомые всем дачникам осы-веспины, куда относятся и шершни. Жизненный цикл *моногинного* осинового гнезда, порождающий многочисленные ассоциации, основан на способности перезимовавших оплодотворенных самок откладывать яйца в течение нескольких теплых месяцев: в средних широтах с мая по сентябрь. На первом этапе осиная матка сооружает бумажное гнездо из пульпы

пережеванной древесины, помещает туда несколько яиц и сама выкармливает личинок, добывая и пережевывая для них насекомых. От недостаточного питания на свет появляются рабочие осы: бесплодные самки, по размерам в полтора-два раза меньше матери. Примерно через месяц осиная матка перестает вылетать, продолжая откладывать яйца. Расширением растущего гнезда, уходом за «царицей» и плотоядными личинками занимаются рабочие особи. (Взрослые осы в основном питаются нектаром, но молодь выкармливают насекомыми – чем приносят большую пользу саду и огороду).

Благодаря увеличению числа рабочих ос, ближе к концу лета питание личинок становится достаточным для того, чтобы самые жизнеспособные из них развивались в полноценных, способных к размножению самцов и самок. Это молодое пополнение колонии не делает в гнезде ничего полезного – лишь отбирает пищу у рабочих и личинок, озабоченное исключительно будущей «настоящей жизнью»: копуляцией вне стен родного дома. И хотя рабочие особи (отнюдь не забитые: агрессивные и вооруженные жалом) вполне могут убить и съесть наименее расторопных отпрысков-паразитов, в конце теплого сезона происходит распад гнезда. Уцелевшие половозрелые осы покидают колонию, а старая царица вместе с уменьшающимся количеством рабочих заканчивают свои жизни, обрекая на гибель оставшийся приплод. В новом поколении самцы, которые играют скромную роль у общественных насекомых, после периода интенсивных спариваний погибают, оплодотворенные самки зимуют – и выжившие с наступлением тепла начинают новый коллективный жизненный цикл.

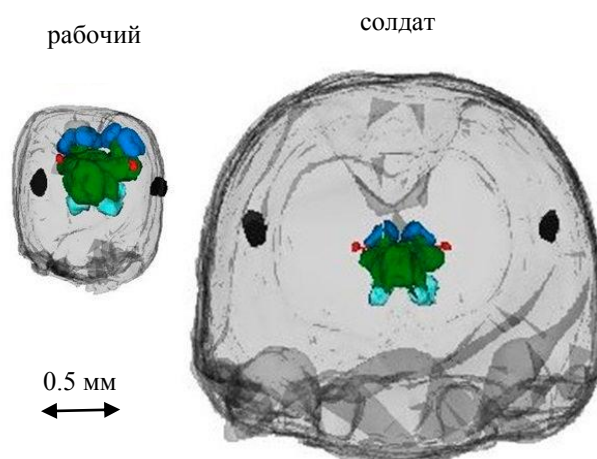
Для разных видов и в разной обстановке данная схема может значительно усложняться. Несколько оплодотворенных самок могут основать общую *полигинную* колонию – что повышает вероятность ее выживания, однако приводит к стычкам осиных маток с образованием иерархии (см. разд. 9.3.1 в гл. 9). Способными к оплодотворению и оплодотворенными «на стороне» могут также оказаться некоторые рабочие осы; вместе с субдоминантами они создают резерв выживания гнезда в случае гибели матки. Некоторые виды ос из зоны умеренного климата, завезенные в субтропики, образуют многолетние гнезда. Во всех случаях разделение на рабочую и репродуктивную касты в сложных колониях поддерживается через иерархию, устанавливаемую силовым путем в стычках оплодотворенных самок (нередко убивающих конкуренток) между собой и с рабочими особями – где, из-за неравенства сил, конфликт чаще ограничивается позами доминирования и подчинения. Поскольку масса, размеры и индивидуальная приспособленность у живых существ одного вида изменчивы, некоторое подобие иерархии складывается и внутри рабочей касты.

Высшими эусоциальными насекомыми являются медоносные пчелы (ниже которых по сложности социальной структуры помещаются шмели), многие виды муравьев и термиты. Для них характерны многолетние колонии (гнезда шмелей однолетние), полная репродуктивная специализация (для пчел почти полная: некоторые рабочие особи способны откладывать яйца, так как самцы-*трутни* постоянно присутствуют в улье) и большое разнообразие рабочих функций: строительство гнезда и его чистка, выращивание молодежи, разведка, фуражировка, наблюдение, защита гнезда. У некоторых видов муравьев и большинства термитов последняя функция приводит к выделению подкасты крупных рабочих, или «солдат»: лучше вооруженных, но с меньшими когнитивными способностями

(рис. 10.1). Более обучаемые малые рабочие особи в течение жизненного цикла (у муравьев в теплое время обычно 1-2 месяца, у одомашненных пчел до нескольких месяцев; перезимовавшие насекомые могут прожить больше года) несколько раз меняют род занятий. В нормальной ситуации около трети всех рабочих особей в гнезде не выполняют никаких функций, тем не менее получая питание от других членов колонии; эта «резервная армия труда» переменного состава мобилизуется в экстренных обстоятельствах.



(а)



(б)

Рисунок 10.1. (а) «Солдат» (указан стрелкой) и малые рабочие особи муравья-кочевника *Eciton burchellii parvispinum* (фотография из Интернет). (б) Расположение мозга в головах муравьев: темно-зеленый цвет – протоцеребральная масса, красный – зрительные доли, синий – области памяти и обучения, голубой – химические сенсоры (O'Donnell et al. BMC Zoology, 2018 3:3; <https://doi.org/10.1186/s40850-018-0028-3>)

Структура колонии у высших эусоциальных видов поддерживается преимущественно химическим путем благодаря выделению *феромонов*-аттрактантов, которые делают царицу привлекательной для остального населения гнезда и бескровно подавляют его репродуктивные возможности. Химический канал передачи информации среди насекомых является первостепенным: в частности, возбуждение и мобилизация против внешней угрозы (например, вспышка агрессивности ос и пчел при приближении постороннего

существа к гнезду) также вызывается выделением феромонов. Другим общим признаком таких видов является постоянный обмен продуктами жизнедеятельности между всеми особями (*трофаллаксия*), для термитов перерастающий в коллективное пищеварение. На трофаллаксии основан механизм распознавания «своих» по запаху – в том числе проживающих в гнезде насекомых другого вида либо, в опытах биологов, неодушевленных предметов. Явные аналогии в структуре и функционировании существенно разных колоний – пчел, муравьев (бескрылых родственников ос, у которых способны летать лишь половозрелые особи в короткий брачный период) и родственных тараканам термитов (где также имеет временные крылья лишь каста, способная к размножению) – свидетельствуют об их эволюционном, а не целенаправленном генезисе.

Видимые параллели коллективных процессов в человеческом обществе и «социумах» насекомых – строительство жилища, «сельское хозяйство» (муравьи опекают тлей, употребляя в пищу как их богатые сахарами выделения (*надь*), так и самих тлей; муравьи и термиты устраивают плантации грибницы, питаются *мицелиями*, т.е. грибными телами), распространение колоний по территории и образование «федераций» (см. [1]) не свидетельствуют о наличии интеллекта у муравьев и термитов. Скорее, они позволяют более трезво рассматривать многие человеческие социальные и экономические конструкции не как продукты сознательной деятельности, а как стихийно возникшие в результате стремления к выживанию под давлением природных факторов. Принципиальное отличие человека от других биологических видов заключается не в изобретении государства, земледелия или рабовладения, а в мгновенном, в масштабах времени биологической эволюции, закреплении их полезных свойств путем обучения. Действительно, муравьи и термиты существуют десятки миллионов лет (время возникновения их «сельского хозяйства» точно не установлено), тогда как у людей *неолитическая революция*, или переход от охоты и собирательства к производящей экономике, в населенных регионах Земли произошла в интервале от X до II тысячелетий до н.э.⁴.

«Рабовладение» муравьев, как общеизвестную аналогию с длительной человеческой практикой, надо отметить особо, поскольку это явление из жизни общественных насекомых не является рабовладением. Нападениям муравьев подвергаются очень многие животные – в том числе муравьи других видов. При разграблении чужого муравейника захват личинок и куколок, как способ фуражирования, благодаря стохастическому поведению насекомых в гнезде, неизбежно приводит к появлению из них некоторого количества муравьев другого вида, обладающих запахом «своих» и участвующих на общих основаниях в стихийной жизни колонии. Эволюционное закрепление преимуществ такого процесса породило виды, не имеющие необходимой для выживания доли рабочих, но с избытком «солдат», которые захватывают в муравейниках-жертвах больше куколок, чем нужно для пропитания – например, муравьев-амазонок рода *Polyergus*. Муравьи, вышедшие из трофейных куколок, замещают отсутствующих рабочих, участвуя в коллективных действиях, трофаллаксии и подвергаясь насилию по единой норме для всех нерепродуктивных особей гнезда. Таким образом, «муравьиное рабовладение» – это одна из форм социального паразитизма вида*:

* Еще одна форма социального паразитизма, распространенная у муравьев – «узурпация власти». В этом случае оплодотворенная самка-узурпатор проникает в муравейник близкородственного вида со схожим химическим набором пахучих веществ у его особей. Пробыв там некоторое время и став неотличимой по запаху от остального населения гнезда,

весьма распространенного явления у общественных насекомых. (Строго говоря, к той же категории относится и рабовладение в человеческих сообществах, возникшее по сходному механизму, см.⁴).

10.1.1. Роевой интеллект общественных насекомых

Итак, сложные «человекоподобные» конструкции и социальные процессы у общественных насекомых отражают не индивидуальный интеллект термитов, муравьев и пчел, а тот факт, что многие стороны жизни людей формировались стихийно, без участия индивидуального человеческого интеллекта. «Разум» социальных видов насекомых проявляется иначе: их сообщество в целом реагирует на внешние воздействия много быстрее и адаптируется к нему гораздо лучше, чем отдельные особи. Во многих случаях такую коллективную реакцию приходится признать рациональной. В этом смысле говорят, что семья общественных насекомых или ее некоторая достаточно большая часть обладает *распределенным интеллектом* (РИ).

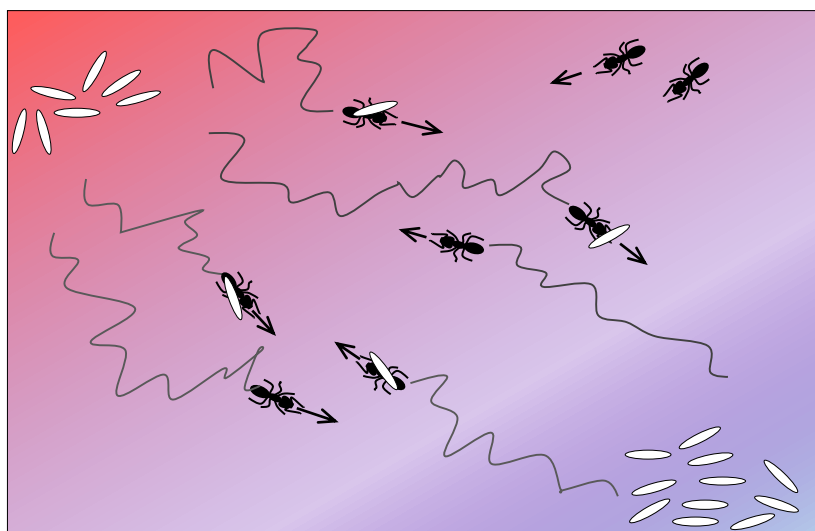


Рисунок 10.2. Схема перемещения муравьями расплода из неблагоприятного участка камеры в благоприятный

Способность к целеполаганию и использование внешней информации для достижения цели (определение (10.1)) проявляется почти у всех живых существ, включая как одиночных, так и общественных насекомых. *Объективной целью* индивида или коллективного агента является оптимальное, в заданных внешних условиях, состояние – соответственно для индивида или сообщества взаимосвязанных индивидов. Если в летний день под перевернутым куском древесной коры обнажится земля с притаившимися там мокрицами, они разбегутся с освещенной поверхности. Если же так раскрыть земляной муравейник – муравьи прежде всего станут уносить личинок и куколок. Цель одиночных

она проникает в камеру к царице, откусывает ей голову при полном попустительстве находящейся здесь же «свиты» (которая реагирует не на действия, а на химические сигналы) и занимает ее место. Потомство узурпаторши, выращиваемое на прежних основаниях рабочими муравейника-жертвы, составляют только способные к размножению чужие особи; зараженный муравейник постепенной погибает – а с ним, во имя некоторой высшей справедливости, гибнет и лже-царица. В этом случае самка паразитического вида действует аналогично вирусу в живой клетке. Подбрасыванием своего потомства в чужое гнездо также занимаются *шмели-кукушки* и другие социальные паразиты [1].

насекомых – индивидуальное выживание; объективная цель общественных насекомых – спасение гнезда.

Объективная цель мультиагентной системы – не тавтология, а вполне содержательное понятие. В экспериментах биологов с муравьями в специальных контейнерах-*формикариях* при изменении условий содержания расплода (например, нагреве пола под местом расположения куколок) муравьи воспроизводимо переносят его в наиболее комфортную зону (см. [1] в списке литературы). Сам процесс перемещения протекает весьма хаотично: некоторые особи возвращают куколок с нового места на старое, другие бегают в обе стороны без ноши, третьи не участвуют (Рис. 10.2) – однако в результате весь расплод покидает зону, ставшую опасной. Преграда, поставленная на пути переноса, заставляет муравьев изменить траектории перемещений, но не их цель: система реагирует не только воспроизводимо, но и гибко. Это одно из проявлений РИ муравьиной колонии. В естественных условиях примерно так же происходит выбор места для новой семьи при роении пчел или направления движения колонны наиболее страшных хищников семейства *Formicidae*: *муравьев-кочевников* (англ. *army ants*), которые не имеют постоянного гнезда и перемещаются между временными «бивуаками», уничтожая на пути все доступное им живое*.

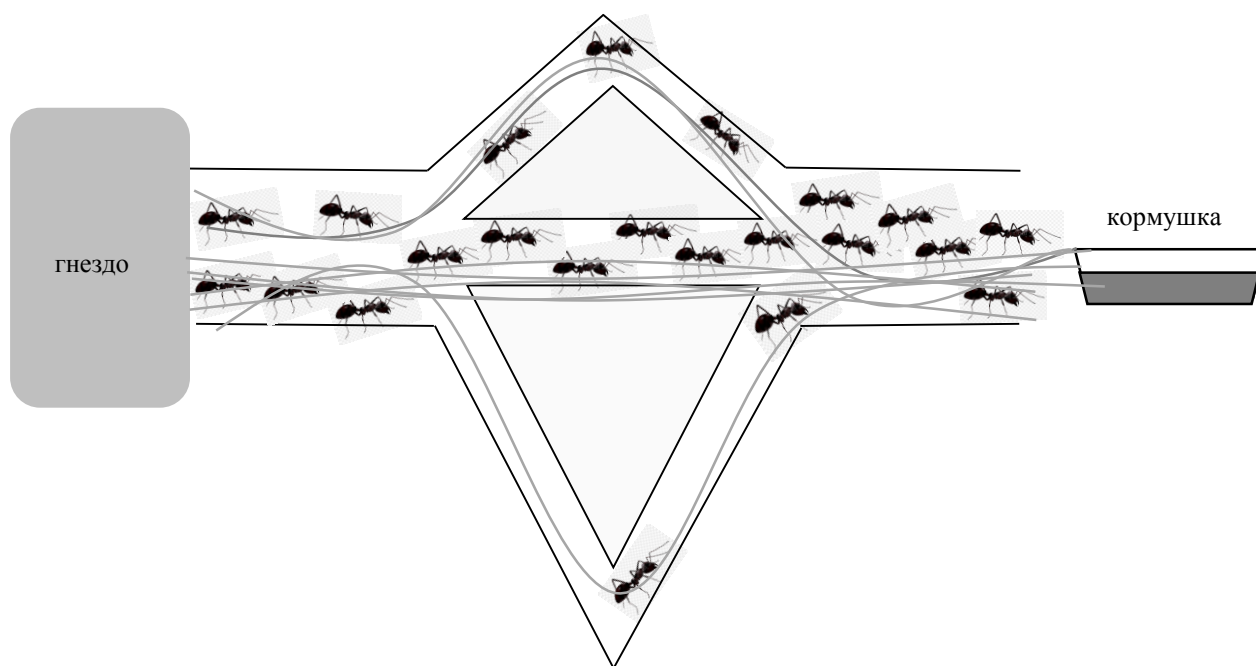


Рисунок 10.3. Перемещение муравьев от гнезда к кормушке: выбор короткой дороги

* При огромном положительном значении муравьев для людей (уничтожение вредителей, процессы образования почвы), в области столкновения интересов современные средства человечества не позволяют ограничить распространение вредоносных видов, не нанося непоправимый урон биологическому разнообразию. Это проявляется и в названиях *инвазивных* видов муравьев, вторгшихся в новую среду обитания без естественных хищников и болезней: *красный* либо *черный огненный муравей* *Solenopsis invicta*, который принес из Южной Америки в США многомиллиардные убытки (названием отражается ощущение от укуса), *желтый бешеный муравей* *Anoplolepis gracilipes*, от которого страдают флора, фауна и туристическая индустрия в тропической области Мирового океана, и мн. др. Инвазивные виды муравьев особенно хорошо изучены.

Выбор дороги муравьями направляется следом феромона, оставленным уже прошедшими особями (не все виды муравьев зрячи). Химическая маркировка вместе со случайными отклонениями насекомых от «тропы» обеспечивают выбор наилучшего пути к оптимальному источнику пищи с экономным испытанием возможных вариантов как в экспериментах (рис. 10.3), так и в естественных условиях. Поскольку феромон с течением времени улетучивается, наилучшему маршруту по механизму положительной обратной связи отвечает максимальное число проходящих особей в единицу времени. По тому же механизму образуются тропинки пешеходов на газонах и на снегу; здесь обоняние муравьев заменяется человеческим зрением (рис. 10.4).



Рисунок 10.4. Тропинки между организованными пешеходными дорожками в кампусе Штутгартского университета (D. Helbing, J. Keltsch, P. Molnar, *Nature*, 1997, 388, 47)

Неосознанная запись и считывание информации биологическими существами за счет изменений внешней среды в XX веке была названа *стигмэргией*. Ее примеры среди общественных насекомых простираются от возбуждения активности гнезда химическими сигналами либо их отсутствием (при гибели царицы возрастает число оплодотворенных самок, что обостряет конкуренцию и улучшает ее результат) до изменения действий рабочих особей по мере возведения муравейников и термитников. Тропинки муравьев, крупных животных и людей – один из многих примеров стигмэргии. Возбуждение общественных насекомых к деятельности протекает не по одному, а параллельно по нескольким каналам (зрительному, обонятельному и осязательному), порождая стохастические циклы (рис. 10.5). Концентрация усилий в максимумах активности – еще

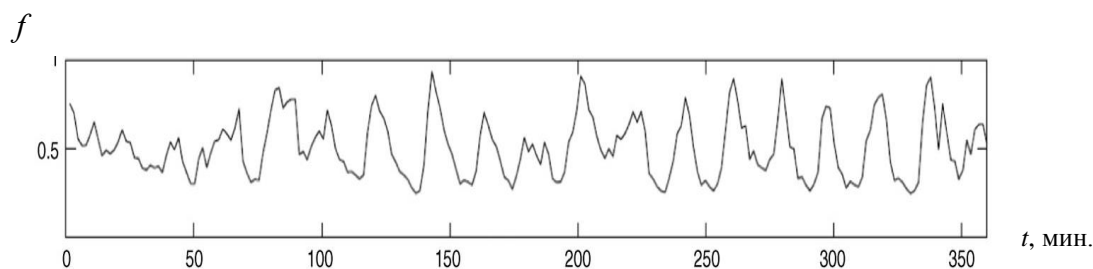


Рисунок 10.5. Циклы активности при строительстве муравейника, f – доля активных насекомых (I.D. Couzin, *Collective cognition in animal groups*, Trends in Cognitive Sciences, 2009, 13, 36)

один приспособительный механизм, способствующий выживанию колонии. Существенно, что даже в максимумах количество активных особей не достигает 100%, отражая наличие коллективного резерва (см. выше).

В колониях пчел, обладающих хорошим зрением, особи-разведчицы сообщают информацию об удаленных источниках пищи путем *танца*, описывая «восьмерки» на вертикально висящих сотах внутри улья. Извилистая внутренняя часть траектории танца указывает расстояние до цели, а ее средняя ориентация относительно вертикали – *азимут* цели, т.е. угол φ между целью и направлением на солнце (которое пчелы различают даже сквозь неплотные облака). По мере движения солнца по небу передаваемый танцем угол φ для одной и той же цели изменяется (Рис. 10.6). Этот поразительный механизм «обнародования» информации твердо установлен для многих видов домашних пчел. Более естественная, с точки зрения человека, ориентация в магнитном поле Земли для них не реализуется*.

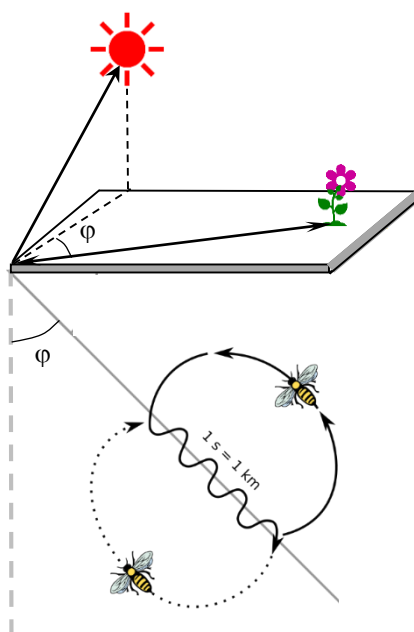


Рисунок 10.6. Танец пчелы-разведчицы на соте (Р. Шовен, *От пчелы до гориллы*, пер. с франц., М.: Мир, 1965)

10.1.2. Роевой интеллект других животных

Распределенный интеллект общественных насекомых в литературе обычно называется *роевым* (англ. *swarm intelligence*). Для него характерны высокая доля хаотического поведения особей, ненаправленный или слабо направленный обмен информацией и ее запись во внешней среде – в частности, химическими средствами. Управляющие единицы в этой форме РИ отсутствуют: матка-царица выполняет только репродуктивные функции, а иерархия в колонии насекомых (в том числе биохимическая), ее кастовая структура и специализация рабочих особей проявляются на фоне беспорядочных действий. Тем не

* Хотя в телах пчел содержатся чувствительные к магнитному полю *суперпарамагнитные* микрокристаллы магнетита Fe_3O_4 , в улье, помещенном во внешнее магнитное поле – как нивелирующее (до остаточных 2%) магнитное поле Земли, так и поворачивающее его силовые линии на 90° – не было выявлено изменений в эффективности передачи информации от разведчиков к фуражирам (V. Lambinet, et al., PLoS ONE 2014, 9 (12): e115665. doi:10.1371/journal.pone.0115665).

менее, уже в этом виде распределенного интеллекта мультиагентная система «дрейфует» в сторону своих объективных целей и обрабатывает информацию значительно лучше, чем индивидуальные особи. Наличие даже простейшего роевого РИ является конкурентным преимуществом общественных биологических видов, объясняющим их распространенность в природе.

Роевым интеллектом в широком смысле обычно называют «стохастический» вид РИ с высоким вкладом случайного поведения агентов, непосредственно не связанный с иерархическими структурами. При переходе от беспозвоночных к позвоночным животным и, далее, к птицам и млекопитающим индивидуальные когнитивные возможности особей возрастают, а их деятельность становится все более богатой и разносторонней. Это, в частности, сопровождается появлением и усложнением иерархий внутри биологических систем. Проявления роевого интеллекта при этом сокращаются – тем не менее, некоторые его элементы присутствуют даже в поведении массы людей.

Подчинение и иерархия среди животных

Норвежских крестьян в начале 1920-х годов вряд ли интересовал смысл занятий ученого-биолога и его студентов, весь день сидящих на птичьем дворе с блокнотами. Это было и хорошо: каждый наблюдатель следил за специально для него помеченной курицей и всякий раз, когда она клюнет другую курицу, ставил галочку в левой половине страницы блокнота, а когда его птицу клевали другие особи – в правой. Подобные занятия ученых на деньги налогоплательщика могли вывести крестьян из скандинавской невозмутимости. По результатам таких (или примерно таких) наблюдений Торлейф Шельдеруп-Эббе в 1922 г. опубликовал большую статью «О социальной психологии домашних кур»^{*}, ставшей одним из краеугольных камней второго, после открытия генов, крупнейшего достижения биологии XX века: доказательства социальной структуры в сообществах животных. Обнаруженный им *порядок клевания*, или иерархия особей (α -курица безнаказанно клюет и гоняет всех остальных, β -особь клюет всех, кроме «альфы», от которой ей достается самой, и т.д.), по-английски *pecking order*, оказался устойчивой характеристикой любого птичьего двора – и до сих пор, в полшутливом смысле, обозначает отношения подчинения в организациях и фирмах.

Иерархия, или неравный доступ к ограниченным ресурсам (пище, спариванию и другим признакам места под солнцем) в сообществах животных устанавливается по совокупности физических сил, жизнестойкости и индивидуальной сообразительности особей преимущественно в нелетальных стычках. Иерархия вместе с образованием коалиций, или групп, снижающих ее давление на подчиненные уровни (см. разд. 9.3.1 в гл. 9), определяют сложную структуру сообществ животных. Их весьма сложное поведение с середины XX века систематически исследуется в рамках *этологии*⁵. Роевой РИ в таких системах преимущественно проявляется там, где воздействие иерархии минимально: при трехмерном перемещении стаи птиц или косяка рыб, движении пешеходов в городе или обмене мнениями пользователей социальных сетей.

^{*}Т. Schjelderup-Ebbe, Zeitschrift für Psychologie, 1922, **88**, 225.

Отметим, что созданная эволюцией иерархическая структура сообщества животных, или система «распределенного» угнетения – важнейший механизм выживания вида. Угнетенное состояние большинства особей в нормальных условиях – аналог сжатой пружины, срабатывающий при резком уменьшении численности популяции. Так, непрерывная борьба с мышами и крысами в городах обусловлена тем, что любые яды, безопасные для людей, уничтожают не более 85-90% всех вредителей. Угнетение особей из-за взаимной агрессии в колонии грызунов (*деме*), по общим биологическим законам, снижает их продуктивность. После применения ядохимикатов социальное давление уменьшается: мыши, в нормальных условиях убивающие подсаженного в клетку чужака, становятся дружелюбными к посторонним особям своего вида, их репродуктивный возраст падает, плодовитость возрастает – и распрямленная экологическая пружина быстро восстанавливает численность популяции.

Тем не менее, существуют «мягкие» (по отношению к окружающей среде) и эффективные методы борьбы с грызунами, описанные в интереснейшей книге⁶. В них чередуется применение ядов и нейролептиков. Последние, поедаемые с приманкой в первую очередь оставшимися доминантами, временно подавляют их активность, что приводит к борьбе за доминирование среди других особей, а через некоторое время – к атаке пришедших в себя «альфа» на новую иерархию. Чередование мышинных революций и контрреволюций поддерживает в животных высокий уровень стресса, препятствующий размножению – и следующее применение яда может выбить популяцию ниже уровня устойчивого воспроизведения. Таким образом, схемы «цветных революций» XXI века в ряде государств мира опираются на прочный этологический фундамент. Ломка сколь угодно нечеловеческой (для животных это достигается автоматически), но устоявшейся архитектуры сообщества при отключении компенсирующих механизмов приводит к войнам всех против всех и к вероятной гибели системы, включая социальные системы людей.

Роевой интеллект позвоночных

Корреляция перемещений особей в стаях рыб или птиц (см. рисунки 5.10 и 5.11 в главе 5) – составная часть роевого распределенного интеллекта. Переключения режимов коллективного движения, рассмотренных в разд. 5.2, регулируют разные виды динамики: целенаправленное движение (собственно стая), хаотические смещения (*рой*) и «вихревое» перемещение косяка рыб, вызванное их гидродинамическим взаимодействием (см. главу 5). К этим режимам необходимо добавить рассредоточение враспыльную при приближении хищника, в котором инстинкты следования за соседями складываются с сильной реакцией избегания опасности (рис. 10.7). Резкое снижение числа особей в единице объема при рассредоточении – еще одно средство выживания вида. Для приведения его в действие у косяка рыб как целого должен существовать круговой обзор – который и достигается в режиме «роя» (см. рис. 10.7 а). Как и у общественных насекомых, в этом случае эффективность совместной обработки информации многократно превышает возможности отдельной особи.

Интерес математической биологии к трехмерному движению птиц и рыб в конце XX века был вызван, в том числе, отсутствием вожаков у перемещающейся массы – то есть автоматической выработкой «консенсуса» по скорости и направлению перемещения.

Движение птичьих и рыбьих стай, а также формаций беспилотных аппаратов (которые и представляют основную практическую ценность), как и динамика колоний общественных насекомых, успешно поддается компьютерному моделированию⁷. Такие модели позволяют воспроизвести «эмерджентные» стороны роевого интеллекта (например, рассредоточение при возникновении опасности), однако не дают им объяснения.

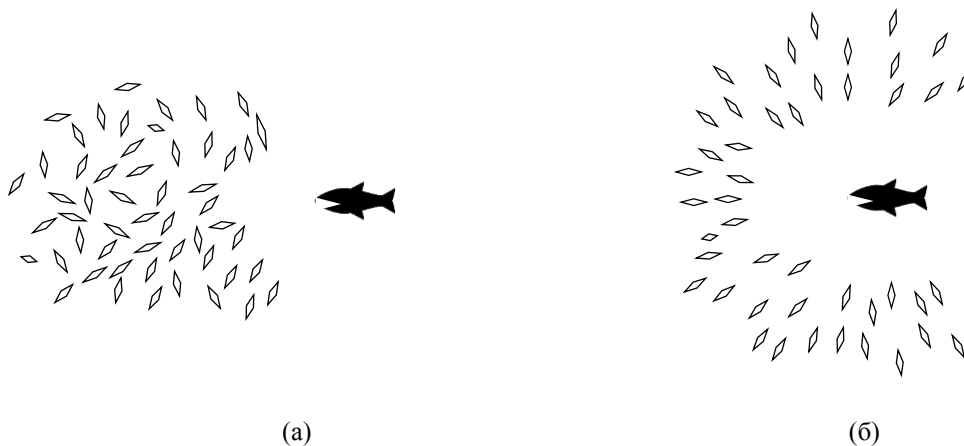


Рисунок 10.7. Рассредоточение «роя» рыб (а) при приближении хищника (б)

На качественном уровне основу многообразной роевой динамики составляют три фактора:

- автономия и (не у всех видов) индивидуальное целеполагание агентов
- взаимосвязь агентов в форме притяжения, отталкивания и следования (см. рис. 5.11 в главе 5)
- элементы хаотической динамики агентов

Эти принципы позволяют сконструировать роевой интеллект в системе дронов или виртуальных частиц (см. следующую главу), которые сами по себе обладают нулевыми когнитивными возможностями. В этом случае способность мультиагентной системы как единого целого воспринимать, обрабатывать и гибко использовать информацию проявляется особенно наглядно.

«Разум толпы»

Коллективное движение по поверхности обычно направляется притяжением к целям и уклонением от препятствий, в том числе от соседних индивидов*. Элементы роевого интеллекта, в частности, проявляются при свободном, без светофоров и турникетов, движении пешеходов по городу. В бессознательной обработке информации, характерной для такого РИ, участвует, например, большинство людей в толпе, обтекающей препятствие: его могут видеть только близкие к нему пешеходы, а все прочие изменяют направление движения вместе с идущими возле них (рис. 10.8 а). «Стихийный» РИ массы пешеходов

*Одним из парасоциальных видов насекомых можно считать саранчу, стаи которой мигрируют в воздухе на большие расстояния и в районах приземления причиняют огромный вред сельскохозяйственным культурам. Массы «пешей» саранчи также могут передвигаться: в отсутствии корма на разоренной местности между особями начинается каннибализм, а согласованные отползание и преследование приводят стаю в движение по поверхности земли⁷.

проявляется при их движении в противоположных направлениях по тротуарам и коридорам как спонтанное разделение на встречные потоки, повышающие пропускную способность маршрутов (рис. 10.8 б). Во всех таких случаях люди приходят к «консенсусу» относительно направления и скорости перемещения, не обдумывая своих действий и без помощи речи. Роевой интеллект массы пешеходов интенсивно исследуется и воспроизводится агентными моделями, которые используют в расчетах для городского хозяйства (раздел 5.4 главы 5).

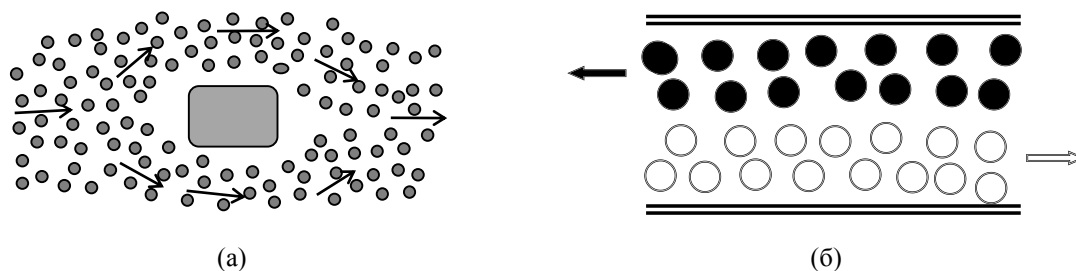


Рисунок 10.8. Движение пешеходов: (а) обтекание препятствия толпой, (б) разделение на встречные потоки (см. D. Helbing, A. Johansson, *Pedestrian, crowd and evacuation dynamics*, in R. Meyers (Ed.) *Encyclopedia of Complexity and System Science*, N.Y.: Springer 2009, 6476)

Еще одним проявлением массового интеллекта можно считать мнения или оценки, усредненные по большой совокупности людей. Такие средние значения могут оказаться точнее большинства индивидуальных ответов, по которым они рассчитаны. В одной из первых статей на эту тему с характерным названием ‘Vox populi’ британский энциклопедист и социальный дарвинист Фрэнсис Гальтон привел результаты оценок «на глаз» убойного веса быка, сделанные посетителями сельскохозяйственной ярмарки 1906 г. в Плимуте*. Хотя сама викторина проводилась в рекламно-коммерческих целях (участники покупали карточки по 6 пенни за штуку, точные ответы вознаграждались из вырученных денег), ее условия эффективно отсеивали неспециалистов и шутников. Обработка 787 карточек показала, что медиана оценок отличалась от фактического убойного веса (быка забили «в реальном времени») лишь на 11 фунтов (5 кг), или 0.8%. Этот один из первых примеров документированного «разума толпы» (англ. *wisdom of crowd*)**, кроме того, хорошо показывает текучесть этических норм и экологического сознания людей в масштабах одного столетия.

Многочисленные повторения подобных статистических исследований в XXI веке подтвердили, что в поиске не общеизвестной информации среднее значение по большому массиву опрошенных оказывается лучше большинства индивидуальных ответов. В эксперименте сотрудников Стэнфордского университета (США) проводился интернет-опрос 2 тыс. участников с 1 тыс. вопросов по 50 разным областям знаний. Статистическая обработка результатов количественных ответов (например, «в каком году начался фабричный выпуск автомобилей?», «сколько калорий содержится в одном курином яйце?»)

* * F. Galton, *Nature* 1907. Vol. 75, No 1949. P. 450.

** Диалектика «разума» (*wisdom of crowd*) или, в других ситуациях, «безумия» толпы (*madness of mob*, см. разд. 8.6.4 в гл. 8) неоднократно обсуждалась в литературе. В английском языке различаются *crowd* (толпа как тесная масса людей) и *mob*: толпа как низменное, часто агрессивное сборище (*mobbed* – растерзан толпой). Роевой интеллект бесструктурной толпы в любом случае не отличается высокой эффективностью.

и т.д.) с их ранжированием по отклонению от правильной цифры показала, что усредненное коллективное мнение (медиана ответов на вопрос) в среднем точнее 2/3 индивидуальных ответов, хотя распределение эффективности РИ оказалось широким и неравномерным (рис. 10.9).

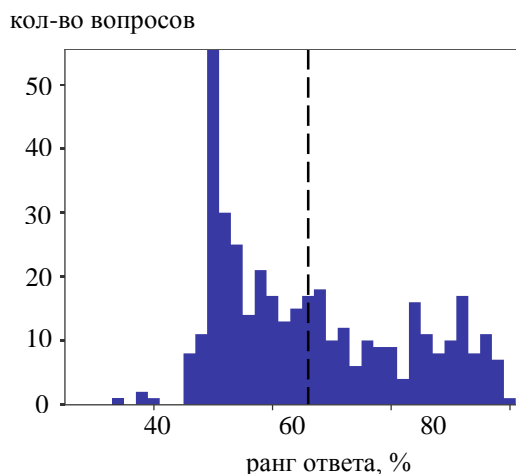


Рисунок 10.9. Распределение точности («ранга») усредненных ответов респондентов на предложенные им вопросы по сравнению с индивидуальными ответами: 100 – лучше всех индивидуальных, 80 – лучше 80% индивидуальных и т.д. Штриховая линия – медиана средних ответов по всем вопросам (лучше 66%). См. С. Simoiu, C. Sumanth, A. Mysore, S. Goel. *A large-scale study of the ‘Wisdom of Crowds’*, Web of Stanford University, 2019. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Large-Scale-Study-of-the-“Wisdom-of-Crowds”-Simoiu-Sumanth/23810e0888de1fa6583b35bed24f02b41a926062>

Одним из проявлений роевого интеллекта в человеческих сообществах можно считать знаменитую *невидимую руку рынка*: объективную оценку стоимости товаров по балансу спроса и предложения, где продавцы и покупатели преследуют только собственные материальные цели (см. разд. 1.5.1 в гл. 1 и главу 8). На тезисе о рынке, как наилучшем из всех возможных механизмов обработки экономической информации, основаны многие разделы неоклассической экономики и идеологии капитализма. С начала XXI века роевой интеллект пользователей Интернет применяется для ранжирования ссылок в поисковых запросах* по числу предыдущих обращений к данному источнику информации. Прямой интернет-аналог маркировки муравьиных тропинок феромоном действует очень эффективно: в большинстве случаев список ссылок возглавляют наиболее интересные и полезные материалы. Применение роевого РИ в разных аспектах человеческой деятельности на популярном уровне обсуждается в книге⁸.

Литература к разделу 10.1

¹ З.А. Зорина, И.И. Полетаева, *Зоопсихология. Элементарное мышление животных: учебное пособие*. –М.: Аспект Пресс, 2002.

² Д. Каспарьянц, *Обзор доклада Стэнфордского университета «Индекс искусственного интеллекта 2022»* https://rdc.grfc.ru/2022/05/artificial_intelligence_index_report_2022/

³ В.В. Петухов, *Психология мышления. Учебно-методическое пособие*. М.: МГУ, 1987.

⁴ А.П. Назаретян, *Цивилизационные кризисы в контексте универсальной истории*, 2 - е изд. –М.: Мир, 2004.

⁵ Н. Тинберген, *Социальное поведение животных* (пер. с англ.). М.: Мир, 1993.

*Впервые реализованного поисковой системой Google PageRank в 1998 г. (разд. 6.3.1 в гл. 6).

⁶ С.А. Шилова, *Популяционная экология как основа контроля численности мелких млекопитающих*, –М.: Наука, 1993.

⁷ T. Vicsek, A. Zafeiris, *Collective motion*. Phys. Rep. 2012. **517**, 71.

⁸ Дж. Шуровьески *Мудрость толпы. Почему вместе мы умнее, чем поодиночке, и как коллективный разум формирует бизнес, экономику, общество и государство* (пер. с англ.) – М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2007.

10.2 Автономные аппараты и теория автоматического управления

В этой главе мы рассматриваем простейшие виды распределенного интеллекта, в большинстве случаев не предполагающие глубокой обработки информации индивидуальными агентами. Эти проявления РИ обнаруживают близкие аналогии с функционированием «протоинтеллектуальных» технических устройств в изменчивой, заранее не запрограммированной обстановке. Для таких устройств (*роботов*) в современных инженерных науках разработано детальное математическое описание, которое указывает путь к формализации общего понятия интеллекта.

Определению интеллекта (10.1), в частности, соответствует робот-пылесос, огибающий препятствия при решении задачи: за ограниченное время обработать всю площадь пола в помещении. В этом случае цель поставлена автономному агенту извне, но восприятие, обработка и использование информации для ее достижения имеют место. (Надо отметить, что внешняя постановка цели реализуется во всех вариантах искусственного интеллекта). В этом разделе будет рассмотрен искусственный *протоинтеллект* автономных аппаратов, описываемый *теорией автоматического управления*.

10.2.1. Теория автоматического управления

*Любая ошибка в любом расчете будет нацелена на причинение наибольшего вреда
закон Мерфи*

Управление динамическими объектами в технике со второй половины XIX века заложило фундамент большой области прикладной математики: *науки об управлении* (англ. *control science*). В настоящее время эта дисциплина существенно пересекается с такими взаимосвязанными областями знания, как кибернетика, робототехника, функционирование ИИ, другими инженерными науками – и входит в них, как составная часть. В XX веке формальные схемы управления с единым математическим аппаратом распространились на биологические, организационные и социальные системы.

По мере развития техники прямое, или «ручное», управление техническими и другими объектами и процессами заменяют системы автоматического управления (САУ). В их принципиальной схеме (рис. 10.10) объект управления (ОУ) и управляющее устройство (УУ) объединены в систему с *обратной связью*, которая вырабатывает *управляющее воздействие*, или *управление* U ($УУ \rightarrow ОУ$) для получения нужной величины (или интервала величин) *выходной переменной* Y при заданных значениях *входной переменной* X и внешних возмущениях ω , затрудняющих работу системы (*шуме*). Если возмущения отсутствуют или мало влияют на выходную переменную, управляющее воздействие $U(t)$ может быть запрограммированной зависимостью от времени (как для огней ёлочной гирлянды или режима работы стиральной машины): это *программное управление*. В ином случае система управления должна включать содержательную обратную связь с компенсацией отклонений – так называемое *позиционное управление* (которое зависит от состояния и (или) выхода

ОУ) или *управление по возмущению* (управление зависит от регистрируемого внешнего воздействия). Обоснование и разработка различных видов САУ составляют основное содержание теории автоматического управления (ТАУ): одного из ключевых предметов в современных инженерных специальностях – см. учебники [2, 3] в списке рекомендованной литературы.

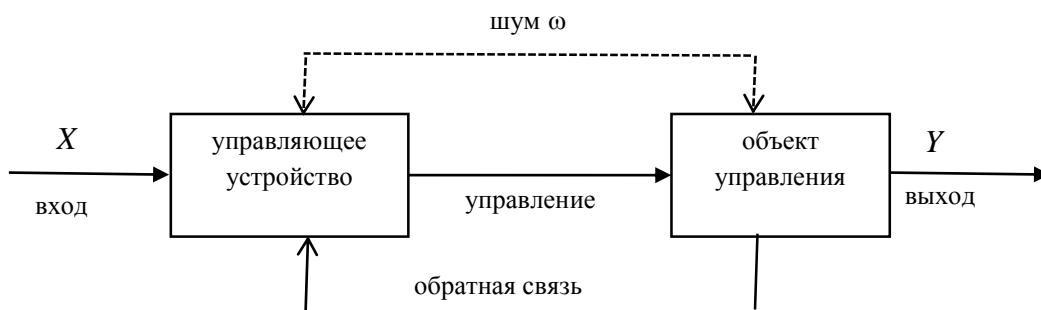


Рисунок 10.10. Общая блок-схема системы автоматического управления (см. [3]. Рис. 1.2)

Пример управления: задача о «шофере-убийце»

Теория дифференциальных игр (см. разд. 7.5 в гл. 7) после Второй мировой войны развивалась в русле военных приложений. Одной из типичных ситуаций на поле боя является преследование агента В лучше вооруженным агентом А, который передвигается со скоростью, большей, чем у В ($v_A > v_B^{max}$), и обладает инерцией, тогда как «безынерционный» В может произвольно изменять направление своего движения. В этой антагонистической игре цель А – сблизиться с В на расстояние, меньшее радиуса поражения a , а цель В – максимально оттянуть этот *терминальный* момент T (составляющий цену игры), приближая его к бесконечности. Данная игра, близкая к многим военным ситуациям (торпеда и катер, зенитная ракета и самолет, общий случай преследования-уклонения) среди математиков получила юмористическое название *шофер-убийца* (англ. *homicidal chauffeur*); агенту В в ней достается роль «безмассового» пешехода.

Динамику перемещения агентов А и В на плоскости (рис. 10.11) задают системы дифференциальных уравнений:

$$(10.2) \quad \begin{aligned} dx_A/dt &= v_A \sin \alpha & dx_B/dt &= v_B \sin \beta \\ dy_A/dt &= v_A \cos \alpha & dy_B/dt &= v_B \cos \beta \\ d\alpha/dt &= v_A u/R, \end{aligned}$$

где $v_A > v_B$, \mathbf{u} – вектор управления игрока А ($|\mathbf{u}| \leq 1$), R – минимальный радиус его разворота; управлением игрока В служит произвольно выбираемый угол β . Без ограничения общности уравнения (10.2) можно привести к безразмерному виду ($v_A = 1, R = 1$)

$$(10.2 \text{ а}) \quad \begin{aligned} dx_A/dt &= \sin \alpha & dx_B/dt &= v_B \sin \beta \\ dy_A/dt &= \cos \alpha & dy_B/dt &= v_B \cos \beta \\ d\alpha/dt &= \mathbf{u}; \quad |\mathbf{u}| \leq 1 & |\mathbf{v}_B| &= \rho < 1, \end{aligned}$$

и к системе координат (X, Y) с началом в положении агента А (рис. 10.11 а).

$$(10.2 \text{ б}) \quad dX/dt = -Y\mathbf{u} + V \cos \beta$$

$$dY/dt = X\mathbf{u} - 1 + V \sin \beta, \quad \text{где } V < 1$$

Система уравнений (10.2 б) не имеет аналитического решения. Для рациональных игроков возможность «поймать» В зависит от соотношения скоростей и радиуса поражения⁹. Эта сложная, решенная только в XXI веке задача показывает, что управляющие воздействия входят в уравнения, которыми определяется динамика системы.

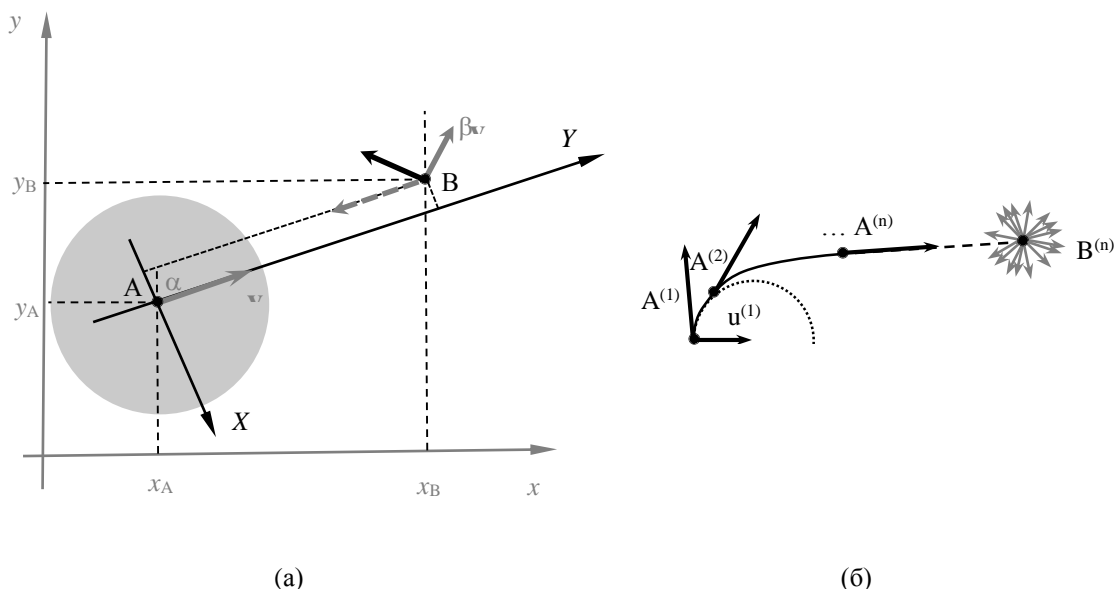


Рисунок 10.11. (а) Координаты и скорости агентов в задаче «шофера-убийцы» в неподвижной системе координат (серый цвет) и в системе координат «догоняющего» агента А (черный цвет). Серым фоном выделен круг поражения. (б) Управляющие воздействия агентов А («сила» \mathbf{u} , показан минимальный радиус кривизны траектории) и В (произвольный угол β)⁹

Динамика линейной системы с управлением

В рамках математической теории управления n параметров, задающих состояние системы, рассматриваются как компоненты вектора $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в n -мерном пространстве состояний (англ. *state space*). Эти параметры, вообще говоря, неизвестны наблюдателю. Доступную информацию об управляемой системе представляет m -мерный вектор наблюдения $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, а управляющее воздействие, как целенаправленное изменение некоторых характеристик системы – p -мерный вектор управления $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_p)$. В общем случае $1 \leq m, p \leq n$. Кроме того, на систему действуют внешние возмущения, или шумы, которые случайным образом изменяют компоненты как вектора состояния, так и вектора наблюдений.

Линейная непрерывная система управления задается системой уравнений

$$(10.3 \text{ а}) \quad d\mathbf{x}/dt = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \boldsymbol{\omega}$$

$$(10.3 \text{ б}) \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \boldsymbol{\theta}.$$

Обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка (10.3 а) соответствуют изменениям во времени компонентов вектора состояния $\mathbf{x}(t)$ с учетом вектора управляющих воздействий $\mathbf{u}(t)$, а уравнения (10.3 б) – зависимости компонентов вектора наблюдений $\mathbf{y}(t)$ от вектора $\mathbf{x}(t)$. «Множители» при векторах в правой части (10.3 а) – это квадратная матрица состояний, или динамическая матрица \mathbf{A} размера $n \times n$ и прямоугольная матрица

управления В размера $n \times r$, в (10.3 б) – прямоугольная матрица выхода С, или матрица наблюдений размера $n \times m$. Кроме того, в уравнения (10.3 а, б) входят случайные величины возмущений $\omega(t)$, изменяющих состояние системы, и шумовых помех $\theta(t)$, изменяющих выходящий сигналы – которые сами могут быть многокомпонентными. Если все компоненты матриц известны и постоянны, система управления называется *стационарной и полностью определенной*.

Уравнения (10.3 а,б) задают изменение состояния динамической системы, к которой приложено управляющее воздействие. Пусть, например, такой системой является математический маятник. Его динамику описывают дифференциальные уравнения второго порядка

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{g}{l}\alpha = 0 \quad \text{без учета трения, или}$$

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \gamma \frac{d\alpha}{dt} + \frac{g}{l}\alpha = 0 \quad \text{с учетом вязкого трения о воздух, } \gamma \text{ – коэффициент трения}$$

(см. разд. 2.2 в гл. 2). Добавляя вынуждающую силу, действующую на груз в горизонтальном направлении, получим уравнения маятника с управлением (рис. 10.12)

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{g}{l}\alpha = u \quad \text{без трения}$$

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \gamma \frac{d\alpha}{dt} + \frac{g}{l}\alpha = u \quad \text{с учетом трения.}$$

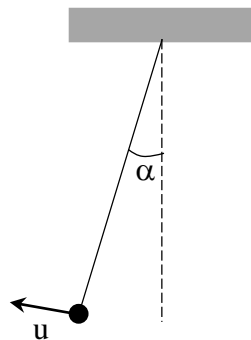


Рисунок 10.12. Математический маятник с управлением (см. [2], рис. 1.1.7)

Вводя обозначения $\alpha = x_1$, $d\alpha/dt = x_2$, как в разделе 2.2, получим систему уравнений вида (10.3 а). Для маятника без трения

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\frac{g}{l}x_1 + u,$$

откуда следуют матрицы

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{g}{l} & 0 \end{pmatrix}, \quad B = (0 \quad 1)$$

(в качестве матрицы В выступает вектор-строка). Для маятника с трением

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\frac{g}{l}x_1 - \gamma x_2 + u, \text{ ПОЭТОМУ} \end{aligned}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{g}{l} & -\gamma \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Чтобы в этом убедиться, достаточно подставить матрицы A и B в уравнение (10.3 а) с $\omega = 0$ и векторами-столбцами

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix};$$

в этом случае управление $u = u_2$, а компонент u_1 не используется (см. [2] в списке рекомендованной литературы, стр. 46-48).

Для автоматического управления состоянием системы необходимо, чтобы вектор \mathbf{u} управляющих воздействий определялся вектором состояния \mathbf{x} – который, напомним, в общем случае неизвестен и лишь оценивается по вектору наблюдений \mathbf{y} :

$$\mathbf{u}(t) = F[\mathbf{x}(t)] = \Phi[\mathbf{y}(t)].$$

В простых примерах управляющее устройство, или *регулятор (контроллер)*, однозначно задается механической схемой – например, в системе подачи топлива в двигатель внутреннего сгорания (рис. 10.13). В общем случае обратная связь на рис. 10.10 должна компенсировать отклонения системы от заданных параметров. Предполагая для простоты, что состояние системы определяет единственный скалярный параметр x , назовем *ошибкой* его отклонение от целевого значения x_0

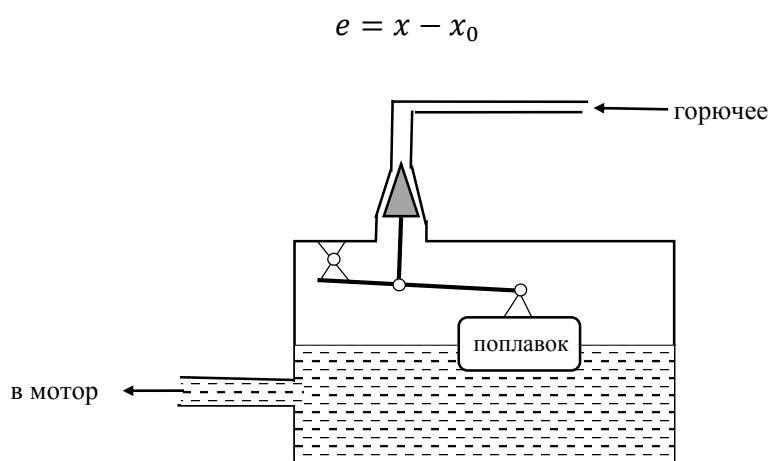


Рисунок 10.13. Поплавковый регулятор карбюратора (см. [3], рис. 1.5)

Линейную связь управления u (также скалярного) с ошибкой e в общем случае задает *пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор* (англ. *PID-controller*):

$$(10.4) \quad u = k_1 e + k_2 \int_0^t e(t) dt + k_3 \frac{de}{dt},$$

где k_1 , k_2 и k_3 – эмпирические *передаточные коэффициенты*. Первое слагаемое в (10.4) называется *пропорциональным*; оно отражает связь управления с ошибкой в момент времени t . Второе, *интегральное* слагаемое тем больше, чем выше накопленная ошибка за время от 0 до t . Третье слагаемое (*дифференциальное*) пропорционально «скорости» изменения ошибки во времени. В разных регуляторах может использоваться каждое из трех слагаемых либо их попарные сочетания: пропорциональный контроллер $u = k_1 e$, пропорционально-дифференциальный контроллер $u = k_1 e + k_3 (de/dt)$ и т.д.

По отношению к возмущающим случайным воздействиям целевое состояние x_0 системы может быть устойчивым, неустойчивым или нейтральным. Система устойчива, если при выходе из состояния x_0 стремится в него вернуться (пример – тяжелый шарик в сферическом углублении при сдвиге из минимума совершает колебания и, с учетом трения, возвращается в нижнюю точку). Пример неустойчивой системы, которая не приходит в определенное состояние – шарик в ящике на горизонтальной поверхности (рис. 10.14 а, б). Подача топлива в карбюратор (рис. 10.13) – нейтральная система: при сдвиге клапана относительно положения поплавка устанавливается другой равновесный уровень жидкости. Близкое к устойчивости понятие *грубости*, или *робастности* (англ. *robust*), означает, что управление системой устойчиво относительно изменения ее параметров в некотором заданном интервале этих изменений и шумовых помех.



Рисунок 10.14. Металлический шарик в углублении: (а) устойчивая система, (б) неустойчивая система

Управляющие воздействия могут осуществляться не непрерывно (как в регуляторе уровня горючего на рис. 10.13), а через определенные промежутки времени Δt . Если все эти промежутки одинаковы, последовательные моменты времени можно пронумеровать и перейти к описанию системы в *дискретном времени*, которому будет соответствовать подстрочный индекс $t = 1, 2, \dots$. В этой записи связь (10.4) управления в момент T с ошибкой в PID-контроллере имеет вид

$$(10.4 \text{ а}) \quad u_T = k_1 e_T + k_2 \sum_{t=1}^T e_t + k_3 (e_T - e_{T-1})$$

(интеграл накопленной ошибки заменяется суммой, а производная – разностью двух ее последовательных значений). Уравнения динамики системы (10.3 а, б) в дискретном времени принимают вид

$$(10.5 \text{ а}) \quad \mathbf{x}_{T+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_T + \mathbf{B}\mathbf{u}_T + \omega_T$$

$$(10.5 \text{ б}) \quad \mathbf{y}_T = \mathbf{C}\mathbf{x}_T + \theta_T,$$

где матрицы \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{C} имеют прежнюю форму, а ω_T и θ_T – соответственно возмущение и шум в момент T , выраженные случайными числами.

Задача теории автоматического управления – построение таких функций управляющих воздействий $\mathbf{u}(t) = F[\mathbf{x}^*(t), \mathbf{y}(t)]$, которые обеспечивают устойчивый целевой режим $\mathbf{x}^*(t)$ функционирования динамической системы с учетом ее наблюдаемых параметров $\mathbf{y}(t)$ при влиянии помех и шумов. Расчет оптимального и устойчивого («робастного») режима управления в ТАУ называется *синтезом контроллера*. В этой области разработаны многие методы описания, построения и оптимизации управления для широкого класса систем: непрерывных и дискретных, линейных и нелинейных (см. [2] и гл. 4 в части I).

Считывание результатов наблюдений $\mathbf{y}(t)$, оценка их связи с фактической динамикой системы $\mathbf{x}(t)$ и выработка управляющих воздействий $\mathbf{u}(t)$ по содержанию задач приближают ТАУ к характеристике интеллекта (10.1) – в данном случае ИИ, так как цель системы задается контроллером. Ввиду необходимости изменений управления при изменениях обстановки с учетом помех, теория автоматического управления примыкает к области искусственного интеллекта и позволяет формализовать это понятие.

10.2.2. Автоматическое управление и робототехника

Робототехникой (англ. *robotics*) называется большая область академических и прикладных дисциплин, занимающихся разработкой и применением *роботов*: автоматических устройств, которые оптимизируют операции человека с внешними объектами и нередко заменяют людей в опасных условиях. В ее разделы входят стандартные приложения роботов (промышленных, транспортных, военных, космических, медицинских, обучающих, бытовых), их функциональные особенности («сухопутные» колесные, гусеничные, би-, тетра- и гексаподы; плавающие и летающие, мультисенсорные, перцептивные, сетевые и др.), зарождающиеся области человекоподобных и социальных роботов, когнитивные взаимодействия машин с человеком и многие другие. В широком смысле к роботам также относят автономные управляющие программы (*биржевые торговые роботы*, системы автоматического поиска, машинного перевода, голосовые помощники) и другие примеры взаимодействий «человек – компьютер».

Области робототехники и искусственного интеллекта перекрываются; в управлении роботами ТАУ играет ключевую роль. Мы рассмотрим здесь лишь одно из приложений автоматического управления, непосредственно переходящее в область ИИ: перемещения автономных мобильных роботов в «зашумленной» окружающей среде. Эти приложения ТАУ позволяют формализовать восприятие и обработку информации интеллектуальными агентами. Другие приложения искусственного интеллекта будут обсуждаться в следующей главе.

Техническое отступление: перемещения робота-пылесоса

Наиболее известный пример бытовых роботов – мобильные пылесосы. Эти автономные устройства убирают помещение, где могут находиться препятствия: мебель, случайно переставляемые стулья, домашние животные и прочие. При разрядке аккумулятора пылесос автоматически возвращается на подключенную к электрической сети *базу*, положение которой его контроллер, соответственно, должен уметь определять. Навигация в изменчивой внешней обстановке, не поддающейся жесткому программированию – одна из главных задач современной робототехники.

Подавляющее большинство роботов-пылесосов имеют форму блина: низкого (5-20 см) цилиндра на двух ведущих колесах с третьим рулевым колесом (рис. 10.15). Эта форма позволяет пылесосу разворачиваться на месте и выбираться из углов помещения, что не по силам прямоугольному аппарату. Чувствительные элементы робота состоят из бампера, реагирующего на механические контакты с предметами (при лобовом столкновении по курсу движения пылесос дает задний ход, при боковом столкновении поворачивает) и системы наблюдения: видеокамеры, лазерного дальномера и инфракрасных датчиков, в том числе показывающих направление на базу. Тип, число и расположение датчиков варьируется в зависимости от стоимости изделия. В дорогостоящих моделях механические детекторы столкновения заменяются ультразвуковыми сенсорами, которые тоже оценивают расстояние до препятствия¹⁰.

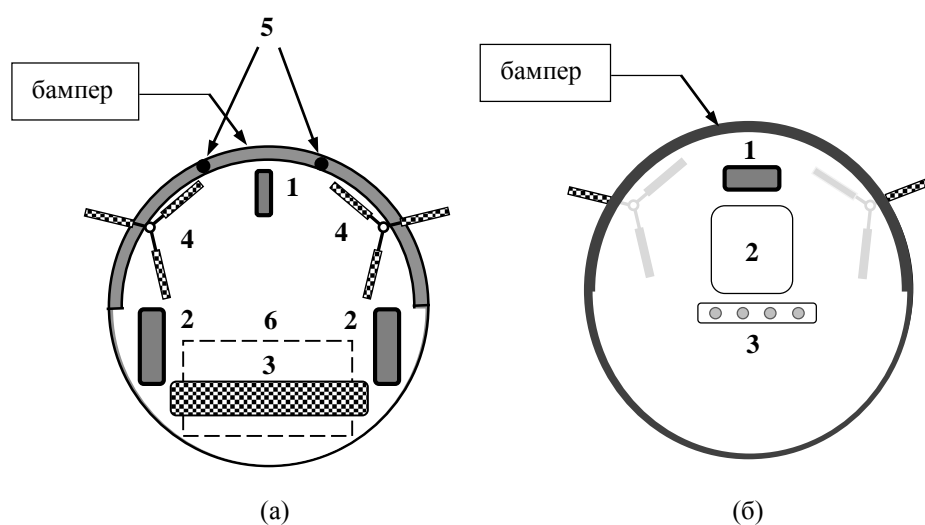


Рисунок 10.15. Узлы робота-пылесоса. (а) Вид снизу: 1 – рулевое колесо, 2 – ведущие колеса, 3 – основная щетка, 4 – боковые щетки, 5 – механические датчики, 6 – пылесборник. (б) Вид сверху: 1 – камера (лазерный дальномер, ИК-датчики), 2 – дисплей, 3 – кнопочный пульт.

Простейшая программа действий робота-пылесоса - движение зигзагами параллельно стенам до обработки всей площади пола. Ее реализация в дешевых моделях вызывает справедливые претензии покупателей: аппарат может долго «биться» возле стены (более дорогие варианты – у зеркала), падать со ступенек, застревать под шкафом и мн. др. Таким образом, функционирование робота в реальной обстановке сопряжено с решением большого числа нестандартных задач, которые нельзя заранее ввести в программу. Гибкая реакция устройства, в понимании гуманитарных наук никак не обладающего интеллектом, на заранее не определенные внешние сигналы – одна из центральных задач робототехники. Связанная с ней академическая задача – необходимость свертывания информации $y(t)$, объем которой, из самых общих соображений, для математически точной локализации аппарата в каждый момент времени должен быть бесконечно велик.

Фильтр Калмана и пространство представлений

Состояние управляемой системы всегда определяется с некоторой погрешностью, а на ее динамику влияют случайные помехи. Пусть, например, маленькая тележка («колесный робот») перемещается по прямой вдоль координаты x со средней скоростью $\langle v \rangle$ (рис. 10.16). В математической модели (10.5) этой простейшей системы матрицы заменяются числами,

управление отсутствует ($B = 0$) и регистрируются положения тележки в последовательные моменты времени $t = 1, 2, 3, \dots$ ($C = 1$). Уравнения (10.5 а, б) принимают вид

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= x_t + v + \omega \\ y_t &= x_t + \theta, \end{aligned}$$

где ω и θ – случайные величины.

В том (и только в том) случае, когда скорость v постоянна и точно известна, исходное распределение возможных положений тележки около точки x_k перенесется в точку x_{k+1} в неизменном виде (пунктирная линия на рис. 10.16). Но поскольку на скорость перемещения робота влияют случайные факторы (перебои в работе мотора, неровная поверхность, встречный ветер), шум θ_k с увеличением k будет возрастать и через некоторое число шагов сделает предсказание x_{k+1} невозможным.

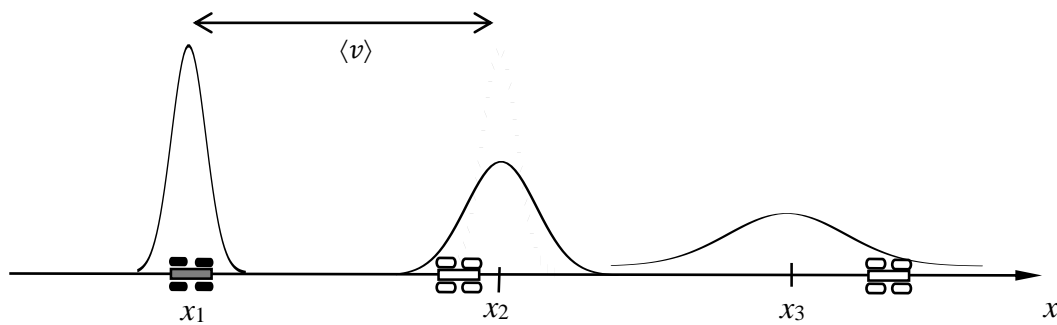


Рисунок 10.16. «Расплывание» возможных положений робота $\{y_k\}$ на прямой линии

Ошибку можно скорректировать, если сохранять в памяти все положения $\{y_k\}$ в последовательные моменты времени (контуры тележки на рис. 10.16), оценивая по ним среднюю скорость и ее дисперсию. Значения $\{y_k\}$ регистрируются по *одометру*: это устройство показывает пройденный путь по числу оборотов колес. Однако для движения по поверхности *одометрия*, дополненная данными о направлении перемещения («положении руля») в каждый момент времени, не дает точной информации о положении робота и требует больших вычислительных затрат.

Более точную навигацию обеспечивает *фильтр Калмана*: экономный алгоритм оценки состояния системы \hat{x}_{k+1} по оценке предыдущего состояния \hat{x}_k и результату измерений y_{k+1} . Результат «смешивания» двух случайных величин (μ_i, σ_i^2), подчиняющихся нормальным распределениям

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

с математическими ожиданиями μ_i и дисперсиями σ_i^2 ($i = 1, 2$), имеет параметры

$$\mu' = \frac{\mu_1\sigma_2^2 + \mu_2\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

$$\sigma'^2 = \frac{\sigma_1^2\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

(см. разд. 8.2.2. в гл. 8 и Приложение П8). Так, усреднение двух гауссовых случайных величин с параметрами (10, 4) и (12, 6) (в скобках приводятся математическое ожидание и дисперсия) даст гауссову случайную величину с параметрами

$$\mu' = \frac{10 \cdot 6 + 12 \cdot 4}{4 + 6} = \frac{108}{10} = 10.8, \quad \sigma'^2 = \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} = 2.4,$$

а величин (10, 6) и (12, 4) (дисперсии двух распределений поменялись местами) – гауссову случайную величину с математическим ожиданием

$$\mu' = \frac{12 \cdot 6 + 10 \cdot 4}{4 + 6} = \frac{112}{10} = 11.2$$

и той же дисперсией $\sigma'^2 = 2.4$. Таким образом, «центр» получаемой величины сдвигается в сторону более узкого распределения и ее дисперсия уменьшается (рис. 10.17).

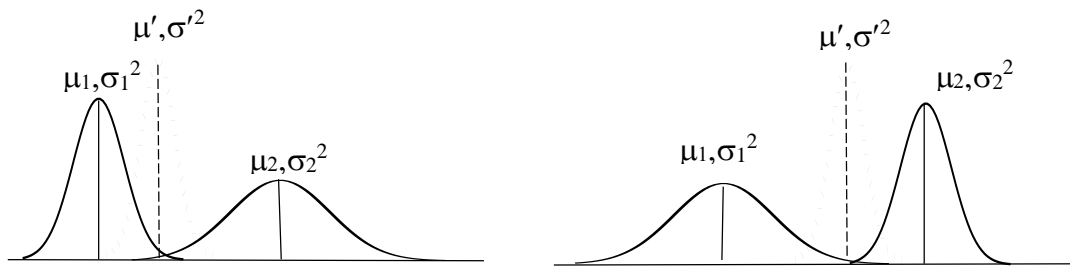


Рисунок 10.17. Усреднение двух гауссовых случайных величин (штриховая линия)

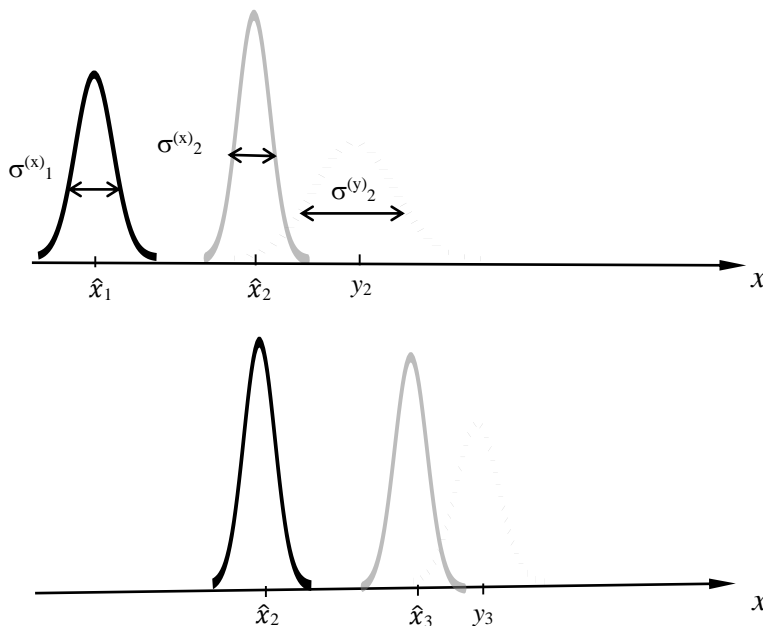


Рисунок 10.18. Оценки координаты x_n при одномерном движении в последовательные моменты времени t_2 и t_3 (см. рис. 10.16)

На этом принципе строится алгоритм рекурсивных оценок последовательных состояний системы, для которой заданы параметры исходного состояния (μ_0, σ_0^2). При одномерном движении, как на рис. 10.16, оценка положения тележки на k -м шаге дискретного времени имеет вид

$$(10.6) \quad \hat{x}_k = Ky_k + (1 - K)(\hat{x}_{k-1} + \langle v \rangle),$$

В общем случае рекурсивные оценки состояний «многомерной» системы $\hat{\mathbf{x}}_k^*$ и их погрешностей P_k^* выводятся из разностных уравнения (10.5 а, б):

$$(10.6 \text{ а}) \quad \begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k^* &= A\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + B\mathbf{u}_{k-1} \\ P_k^* &= AP_{k-1}A^T + Q_1, \end{aligned}$$

где A^T – транспонированная динамическая матрица, Q_1 – матрица ковариаций, т.е. взаимной зависимости случайных помех ω (см. гл. 8). Предварительные оценки (символы со звездочкой) далее корректируются по вектору наблюдений \mathbf{y}_k

$$(10.6 \text{ б}) \quad \begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_k^* + K_k(\mathbf{y}_k - C\hat{\mathbf{x}}_k^*) \\ P_k &= (E - K_kC)P_k^* \end{aligned}$$

с использованием матричного *фильтра Калмана*

$$(10.7) \quad K_k = \frac{P_k^*C}{CP_k^*C^T + Q_2}$$

(E – единичная матрица, Q_2 – матрица ковариаций шума θ при измерениях, C^T – транспонированная матрица наблюдений). Отправной точкой расчета служат оценки исходного состояния $\hat{\mathbf{x}}_0$ и его погрешности P_0 .

Фильтр Калмана эффективно свертывает зашумленные сигналы в сглаженную траекторию (рис. 10.19) и поэтому широко применяется в обработке информации. Оценки состояний $\{\hat{\mathbf{x}}_k\}$, в терминах ТАУ, принадлежат *n*-мерному *пространству представлений* (англ. *belief space*). Точкам этого пространства $(\hat{\mathbf{x}}, P)$ соответствует «представление» системы (в робототехнике термин используют без кавычек) о своем состоянии и о неточности этого представления, которое может выражаться, в соответствии с числом параметров системы, *n*-мерным *шаром погрешностей* $\delta(\hat{\mathbf{x}})$.

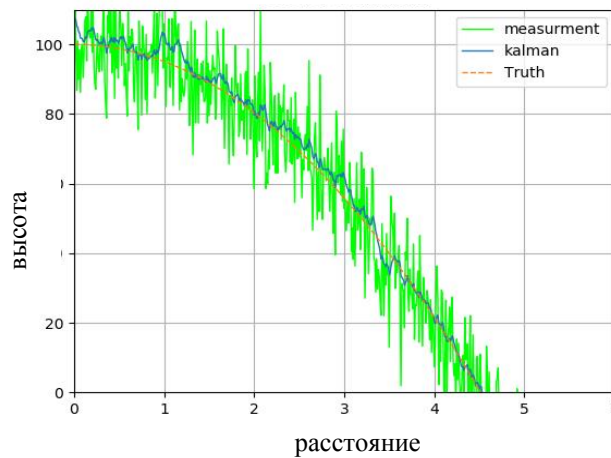


Рисунок 10.19. Моделирование падения тела по параболической траектории (пунктир) с зашумленными измерениями положения (зеленый цвет). Темно-синяя линия – калмановское сглаживание (<https://i.stack.imgur.com/eRBjP.png>)

Мы видим, что уже при описании динамики неодушевленных механизмов, которые должны гибко реагировать на внешние условия, в ТАУ вводятся аналоги *восприятия* и *отражения мира*, обычно обсуждаемых когнитивными науками применительно к людям. В последовательности таких «отражений» каждое представление $\hat{\mathbf{x}}(t)$ рассчитывается из представления $\hat{\mathbf{x}}(t - 1)$ в предыдущий момент времени и «восприятия» текущего состояния по результатам измерений $\mathbf{y}(t)$. Не менее существенно, что каждой точке пространства представлений сопоставлена некоторая погрешность: положения этих точек *размыты*. Отражение действительности, свертка информации и нечеткость образа – общие признаки интеллекта, но они проявляются уже на протоинтеллектуальном уровне робототехники.

Навигация технических устройств

Наиболее совершенные мобильные роботы составляют и используют в навигации карту местности (помещения). Определения своего местонахождения с параллельным построением карты (англ. *Simultaneous Localizations and Mapping, SLAM*) – одно из популярных направлений робототехники. Помимо одометрии, при этом используются привязка к некоторым ориентирам-маякам (например, к углам комнаты), графы взаимного расположения ориентиров и *расширенный фильтр Калмана* (англ. *extended Kalman filter, EKF*), который позволяет установить координаты объектов и их погрешности в пространстве представлений. Положения ориентиров затем уточняются в рекурсивных алгоритмах с повышением точности локализации робота.

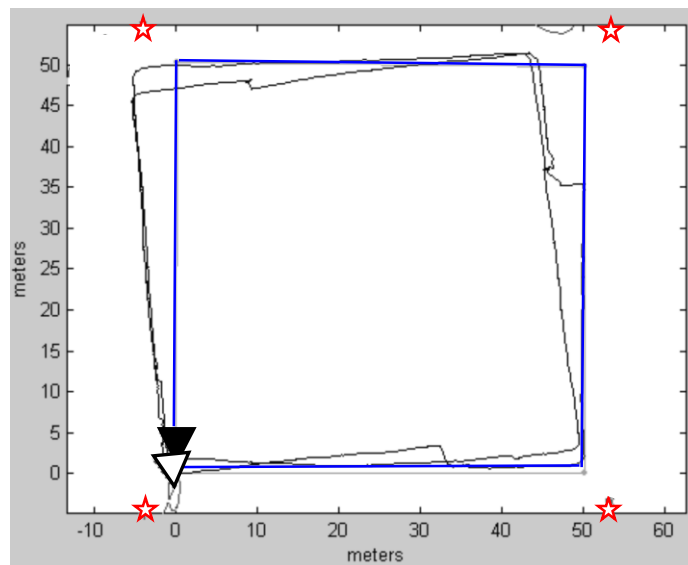


Рисунок 10.20. Расчетное моделирование перемещений робота по методу SLAM с калмановской фильтрацией. Синяя линия – заданная траектория, черная линия – фактическая траектория, звезды – положения ориентиров. Черный и белый треугольники – заданное и фактическое положение робота (по J. Park, S. Lee, J. Park, *Int. J. Adv. Robotic Systems*, 2009, 6 (2), 67)

Ключевой этап успешной навигации – построение замкнутой петли траектории с возвратом в однажды пройденную область (рис. 10.20). Сочетание положения (координат) и ориентации аппарата в этом разделе IT-инженерии называется *позой*. Карта местности, занимающая определенный объем памяти – один из способов отражения окружающей действительности в «сознании» робота, понимаемом как совокупность отражений и связей

между ними. (Подобные логические ловушки в робототехнике называются *проблемой курицы и яйца* и не обсуждаются: приоритеты понятий отражения и сознания с философской точки зрения неочевидны – но здесь речь всегда идет о неодушевленных технических устройствах).

Групповая робототехника и роевой интеллект

Группы взаимосвязанных роботов способны решать общую (поставленную извне) задачу с коллективной обработкой информации, то есть проявлять признаки распределенного интеллекта. Формация мобильных аппаратов с запрограммированными функциями «следовать за соседями» и «избегать столкновений» будет огибать препятствия подобно толпе пешеходов на рис. 10.8 а. В качестве средств связи между роботами, помимо элементов управления из единого центра, используются видеоканалы и радиочастоты (с индивидуальными «метками» каждого аппарата), а также ультразвук, вместе с видеосигналом позволяющий оценить расстояние. Роевой интеллект систем из относительно простых и недорогих взаимосвязанных роботов, во многих отношениях имитирующий РИ общественных насекомых, способен выполнять ряд практически важных операций¹¹:

1. Совместный сбор и рассредоточение по максимальной площади без потери связи
2. Образование геометрической формы (*стая*) и коллективное движение
3. Транспортировка и совместное перемещение объектов
4. Коллективная картография
5. Разделение функций

Основным достоинством формаций роботов является «робастность» коллективных действий: взаимозаменяемость устройств и нечувствительность системы к поломкам некоторого числа единиц. Системы роботов, использующие роевой интеллект (*swarm robotics*) могут применяться для рекогносцировки и работ в опасных для человека условиях, в медицине для манипуляций внутри организма (*нанороботы*), в исследованиях протяженных объектов (картография, геология, сельское хозяйство) и в других областях^{12,13}. Роевой РИ технических систем смыкается с агентными моделями и «подсказанными Природой» алгоритмами расчетов, которые будут рассмотрены в следующей главе.

Очевидными военными применениями роботов (см., например, книгу [6] в списке рекомендуемой литературы к гл. 5) частично объясняется относительно небольшое число содержательных публикаций о РИ распределенных технических систем в открытых источниках. Некоторые достижения в этой области отражают состязания по *робофутболу* (рис. 10.21). Международный научно-инженерный проект RoboCup, начатый в 1996 г., включает ежегодные чемпионаты мира для команд из автономных *антропоморфных** роботов (в их составе до пяти игроков высотой меньше 1 м, пока не вполне владеющих

* Антропоморфным называется робот, по конструкции аналогичный человеку (две руки, две ноги, одна голова, способная поворачиваться на шее; для робота-футболиста два жестко фиксированных глаза и запрет на такие «сверхчеловеческие» возможности, как радиосвязь). Роботы, похожие на людей – как, например, в пьесе Карела Чапека «R.U.R.» – называются *андроидами*.

техники паса и обводки). Заявленной целью проекта является создание к 2050 г. команды роботов, способной обыграть чемпионов мира по футболу. Заметим, что в таких индивидуальных играх, как шахматы и го, подобная задача решена (см. следующую главу). В 2021 г. чемпионами мира в RoboCup стала российская команда МФТИ¹⁴.



Рисунок 10.21. Антропоморфные роботы на футбольном поле¹⁴

Литература к разделу 10.2

⁹ В.С. Пацко, В.Л. Турова, *Игра «шофер-убийца»: история и современные исследования*. Научные доклады, Екатеринбург: УрО РАН, 2009.

¹⁰ А. Казанцев, 8.11.2021. *Так ли умны «роботы-пылесосы»? Рассматриваем датчики для навигации*. <https://habr.com/ru/post/587580/>

¹¹ I. Navarro. F. Matía, *An introduction to Swarm Robotics*, ISRN Robotics, 2013, art. 608164

¹² Е.А. Яковлева, А.А. Сорокин, Р.А. Коваленко. *Роевой интеллект в роботизированном решении пространственных задач*. — Казань: Бук, 2020.

¹³ А.А. Кулинич, В.Э. Карпов И.П. Карпова, *Социальные сообщества роботов*. М.: ЛЕНАНД, 2019.

¹⁴ М. Бабинов, *Когда же роботы будут играть в футбол наравне с людьми?* 20.12.2022, <https://habr.com/ru/company/robouniver/blog/706684/>

10.3. Нечеткое управление

Величины управляющих воздействий в формулах (10.3–10.5) рассчитываются по результатам текущих измерений параметров объекта управления (см. рис. 10.10). При отклонениях значений параметров в автоматической системе возникают компенсирующие воздействия, которые возвращают объект управления в целевое состояние. Однако точная «цифровая» зависимость управляющих воздействий от параметров системы $\mathbf{u}(\mathbf{y})$ в виде таблиц с мелким разбиением интервалов всех переменных требует больших ресурсов памяти. Кроме того, для создания (*синтеза*) управления нужна математическая модель управляемого процесса. Такие модели разработаны не для всех технических систем, включая современные автомобильные двигатели. При нелинейной зависимости $\mathbf{u}(\mathbf{y})$ подобные системы могут сильно реагировать на флуктуации, что грозит потерей устойчивости объекта управления.

Более надежные «робастные» регуляторы современных систем – в том числе таких, для которых еще не построены математические модели – с конца XX века разрабатываются на основе теории *нечетких множеств*. Этот подход, позволяющий проводить расчеты с нестрогими и неточными данными, применяется как к управлению техническими устройствами, так и к описанию динамики социальных процессов. По сравнению со стандартными методами (такими, как PID-контроллеры (10.4) и (10.4 а)), *нечеткое управление* более эффективно, требует меньше вычислительных ресурсов и заменяет аналитические зависимости между параметрами системы набором эмпирических правил ее функционирования.

Нечеткие множества

В разделе 8.2.1 главы 8 были представлены некоторые сведения о множествах и таких операциях с ними, как объединение, пересечение, включение и дополнение (Рис. 10.22, также см. рис. 8.6). Там же были упомянуты некоторые математические конструкции, основанные на множествах: группы, графы, алгебры, игры.

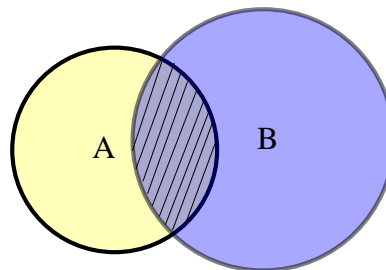


Рисунок 10.22. Объединение множеств $A \cup B$ (сплошной внешний контур) и их пересечение $A \cap B$ (заштрихованная часть); см. также рис. 8.6 в главе 8

Объединения и пересечения множеств наглядно показывают *диаграммы Эйлера-Венна* (рис. 10.23). Наиболее общее определение математических функций $y = f(x)$ (и более сложных) – это отношение между элементами множеств

$$(10.8) \quad f: X \rightarrow Y,$$

где элементам $x \in X$ по правилу f поставлены в соответствие элементы $y \in Y$. Так, например, квадратичная функция $y = x^2$ ставит в соответствие точкам на числовой оси $x \in (-\infty, +\infty)$ точки на полуоси $y \in [0, +\infty)$, а функция $y = \sin x$ переводит точки отрезка $x \in [-\pi, \pi]$ в точки отрезка $y \in [-1, 1]$.

Определение функции (10.8) как проекции множества X на множество Y не зависит от ее конкретной формы. Оно распространяется и на такие закономерности, которые не имеют аналитического вида и могут не выражаться математическими формулами. В разд. 8.6.3 главы 8 нам встретились фрактальные множества, которые широко используются в эконофизике и финансовой математике. Понятие множества – одно из самых общих в математике с огромной областью применения – во второй половине XX века получило дальнейшее развитие.

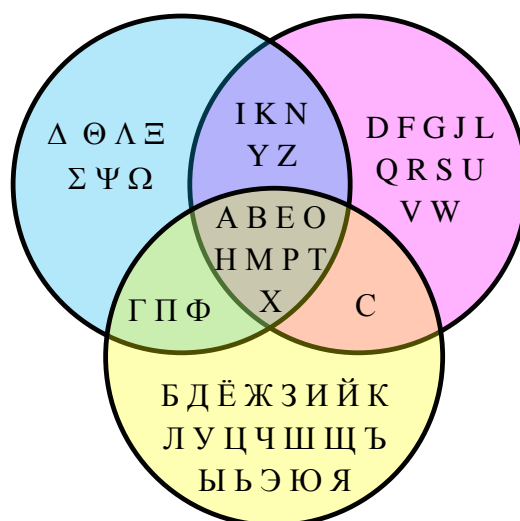


Рисунок 10.23. Диаграмма Эйлера-Венна: начертания прописных букв греческого, английского и русского алфавитов (из Интернет)

Обобщением понятия множества является *нечеткое множество* (англ. *fuzzy set*). Нечеткими называются такие множества, для которых общий признак, объединяющий элементы, указан неточно и обычно зависит от контекста, в котором эти элементы рассматриваются. Поскольку для количественных сравнений, выраженных естественным языком, характерны относительность и неопределенность («примерно равны», «чуть больше», «слабее», «теплее»...), нечеткие множества позволяют производить операции с такими не вполне определенными величинами и соотношениями величин, получая при этом содержательные результаты.

Самый общеизвестный пример нечеткого множества дает реляционный оператор «>>» (*много больше*), часто используемый в математике. Соотношение

$$x \gg 1$$

на бытовом уровне можно считать верным для «больших» чисел ($x = 100$, $x = 999$, $x = 1000$, $x = 1000000$ и т.д., включая нецелые числа), однако оно вряд ли справедливо для $x = 2$ или $x = 13/5$. Запись $10 \gg 1$ можно считать правильной либо неправильной в зависимости от ситуации: в повседневных масштабах трудно утверждать, что 10 г много больше одного грамма, но если речь идет о весе ручного багажа, 50 кг намного тяжелее, чем 5 кг.

В общем случае *нечетким множеством* $A \subset U$, заданном на множестве U , называется совокупность элементов $\{x \in U\}$, каждому из которых придается число $0 \leq \mu(x) \leq 1$, определяющее «степень принадлежности» элемента x множеству A . При $\mu(x) = 1$ элемент x «точно принадлежит» A , при $\mu(x) = 0$ «точно не принадлежит», а всем остальным значениям $0 < \mu(x) < 1$ соответствует «неточная», или условная принадлежность: тем более достоверная, чем ближе $\mu(x)$ к 1. В строгих математических формулировках нечеткое множество – это совокупность пар $A = \{x, \mu_A(x) | x \in U\}$ элементов $\{x\}$ некоторого «обычного» множества U и соответствующих им значений *функции принадлежности* $\mu_A(x) \in [0, 1]$. Множество $U = \text{Supp } A$ называется *носителем* A (символ производится от англ. support), или *универсальным множеством*.

В простом примере на рис. 10.24 а функция принадлежности $\mu(x)$ задана на отрезке $[a, b]$. Точки $0 \leq x \leq a$ и $x > b$ со значением $\mu(x) = 0$ не принадлежат нечеткому множеству ($x \notin A$), а точки $c \leq x \leq b$, которым отвечает $\mu(x) = 1$, достоверно принадлежат A . Точки отрезка между d и c «скорее принадлежат» ($\mu(x) > 1/2$), а между a и d «скорее не принадлежат» A ($\mu(x) < 1/2$); принадлежность точки d множеству A ($\mu = 1/2$) не определена. При замене плавной функции принадлежности на ступенчатую ($\mu(x) = 0$ для $x \notin [a, b]$ и $\mu(x) = 1$ для $x \in [a, b]$) нечеткое множество A переходит в обычное множество точек отрезка $U = [a, b]$ (рис. 10.24 б). Обычные множества, обсуждаемые в едином контексте с нечеткими, называют *четкими множествами (crisp sets)*.

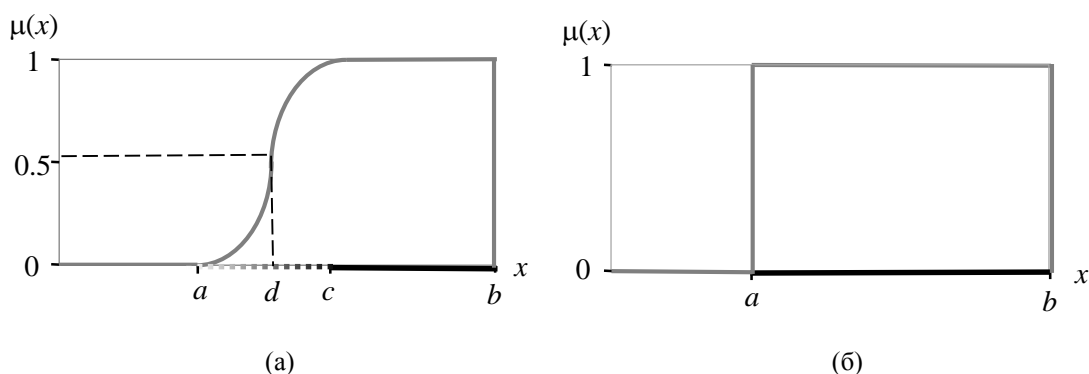


Рисунок 10.24. (а) Нечеткое множество $A \subset U = [a, b]$, (б) обычное множество $A = U = [a, b]$

Соотношения между нечеткими множествами определяются их функциями принадлежности. Если A и B – нечеткие множества, заданные на одном и том же универсальном множестве U , $A \subseteq B$ в том случае, когда $\mu(x)_A \leq \mu(x)_B$ для всех $x \in U$. Если при всех $x \in U$ для них справедливо $\mu(x)_A = \mu(x)_B$, множества A и B одинаковы ($A = B$). Дополнение $\setminus A$ нечеткого множества на универсальном множестве U состоит из всех элементов $x \in U$ с функцией принадлежности $\mu_{\setminus A}(x) = 1 - \mu_A(x)$.

Объединением нечетких множеств $A \cup B$ является множество всех элементов из A и B с общей функцией принадлежности вида

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)],$$

то есть совместная функция принадлежности для каждого элемента имеет максимальное значение из двух таких функций в составляющих множествах (рис. 10.25 а). В пересечении $A \cap B$ нечетких множеств совместная функция принадлежности для каждого элемента принимает минимальное значение (рис. 10.25 б).

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

Эти результаты отличаются от операций с обычными («четкими») множествами, показанными на рис. 10.22 и рис. 8.6 в гл. 8. Так, если множество $B = \setminus A$ – это дополнение

*Для всех нечетких множеств можно задать такой «всеобъемлющий» носитель U , чтобы любые множества в рассматриваемой задаче были его подмножествами – поэтому он и называется универсальным. На рисунке 10.26 универсальным множеством U можно считать все точки числовой оси $-\infty < x < +\infty$. Таким образом, отличие нечетких множеств от четких заключается именно в функции принадлежности.

А на универсальном, т.е. произвольном объемлющем множестве U , то, в отличие от «четких» множеств, $A \cup \bar{A} \neq U$ (объединение A с «не- A » меньше множества-носителя). Кроме того, $A \cap \bar{A} \neq \emptyset$ (пересечение A с «не- A » не пусто).

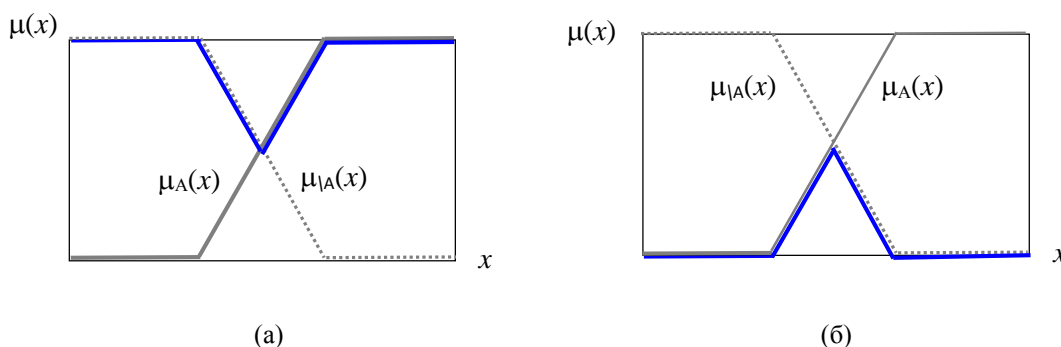


Рисунок 10.25. Композиции нечетких множеств (сплошные линии): (а) $A \cup \bar{A}$, (б) $A \cap \bar{A}$. Основание прямоугольного контура – универсальное множество U

В примере на рис. 10.24 можно считать, что функции принадлежности соответствуют плотности вероятности $f(x \in A)$. Однако смысл $\mu(x)$ шире математического определения вероятности: эта функция задается произвольно, может не быть нормированной, а ее значения – установленными по экспертным оценкам. Нечеткие множества, в которых $\mu(x)$ достигает 1, называются *нормальными*, при $\max[\mu(x)] < 1$ – *субнормальными*. На практике часто используют простые варианты функции принадлежности: треугольные, трапецевидные или гауссовы (рис. 10.26); их параметры определяются условиями задачи.

На основе нечетких множеств вводятся *нечеткие числа* и нечеткие математические операции. Так, нечеткое действительное число $a = \{x \in [a_1, a_2], 0 \leq \mu(x) \leq 1\}$ задается своей *областью определения*: множеством чисел на промежутке (отрезке или интервале) от a_1 до a_2 , за пределами которого функция принадлежности равна нулю. Всеми функциями принадлежности на рис. 10.26 могут задаваться нечеткие числа. Универсальным носителем для них служит множество всех действительных чисел: числовая ось. По тому же принципу можно задавать нечеткие числа на комплексной плоскости. Соответствие между нечеткими множествами, установленное по схеме (10.8), называется *нечетким отношением* или *нечеткой функцией*. Действия с нечеткими множествами и их приложения рассмотрены в учебной литературе (см. [5]).

Нечеткие множества – быстро развивающийся современный раздел прикладной математики. Их впервые предложил в 1965 г. американский математик азербайджанского происхождения Лотфи Аскерзаде* (1921-2017)¹⁵. На основе нечетких множеств Л. Аскерзаде развивал формализм *нечеткой логики* и *мягких вычислений* (см. следующую главу), которые позволяют проводить математическую обработку информации, выраженной средствами естественного языка в *лингвистических переменных*.

* * Фамилия Аскерзаде, указывающая на происхождение из военной страты (ей примерно соответствуют русские фамилии Воинов или Витязев), в американской научной литературе была редуцирована до L. Zadeh и чаще всего так цитируется.

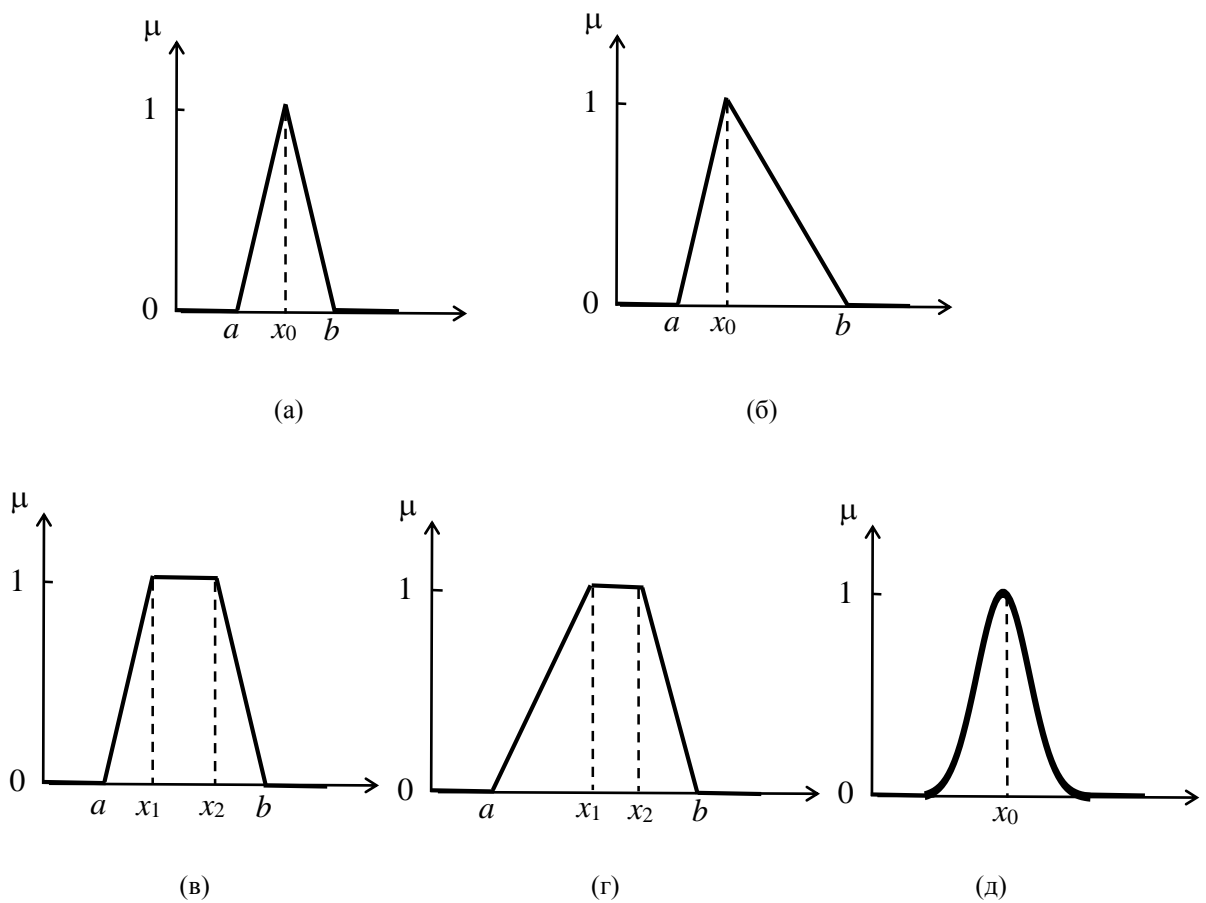


Рисунок 10.26. Часто используемые формы функции принадлежности: (а, б) треугольная, (в, г) трапецевидная, (д) гауссова.

Нечеткий контроллер

*И кто его знает,
Чего он моргает...*

Михаил Исаковский

В схеме нечеткого управления, в соответствии с общими принципами, управляющее устройство вырабатывает воздействие на управляемый объект по зашумленному «входу» и показаниям датчиков (см. рис. 10.10). В отличие от стандартных алгоритмов (например, PID-контроллера), получаемое воздействие не связано жестко с параметрами входа: их варьирование в некотором интервале практически не влияет на управление и, соответственно, на параметры «выхода». Сглаживание достигается в трехступенчатой схеме: точное значение параметра системы, поступающее в нечеткий контроллер, вначале «размывается» в распределение значений входных параметров с весовыми множителями, которое затем переводится нечеткой функцией в аналогичное распределение выходных параметров. На последнем этапе из этого распределения вычисляется значение выхода (рис 10.27). Перевод точных входных данных в нечеткие называется «*фаззификацией*» (калька с англ. *fuzzification*, ФЗФ в подписи к рис. 10.27), второй этап их обработки – *нечетким выводом*, или алгебраическим преобразованием нечетких величин, а третий –

«дефаззификацией»: расчетом средних величин в полученных распределениях (ДФЗФ на рис. 10.27).

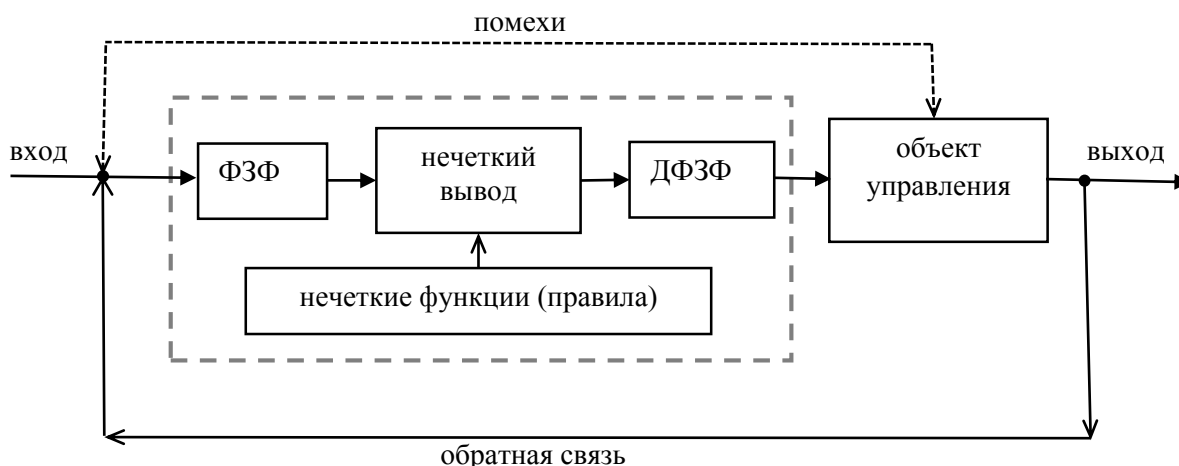


Рисунок 10.27. Схема нечеткого управления: ФЗФ – фаззификация, ДФЗФ – дефаззификация

Распространенный пример нечеткого управления из учебной литературы – автоматическое регулирование температуры воды в душевой кабине¹⁶ (рис. 10.28 а). Если изменять температуру воды в душе краном подачи горячей воды, отклонение от целевой температуры T_0 будет нелинейной функцией от угла поворота крана φ (рис. 10.28 б; положительным значениям отвечает поворот влево, отрицательным поворот вправо), дополнительно зашумленной из-за варьирования напора воды. Чтобы поддерживать целевую температуру в соответствии с графиком на рис. 10.28 б, управляющая система должна хранить в памяти таблицу значений $\varphi(T)$ с достаточно мелким разбиением ΔT (в реалистическом случае $\Delta T=1$ °С и интервала T от 20 до 80 °С – до 3600 чисел) и сглаживать влияние флуктуаций. Стандартному PID-регулятору (10.4 а) на это потребуются дополнительные вычислительные ресурсы; поддерживать постоянную температуру T_0 (либо другой целевой параметр) при высоком уровне помех – трудная задача автоматического управления.

Чтобы построить более эффективную регулировку, точные значения температуры и угла поворота крана на графике зависимости $\varphi(T)$ заменяют нечеткими числами – то есть нечеткими множествами, заданными на некоторых интервалах этих параметров их функциями принадлежности (рис. 10.28 в):

(10.9 а) Температура воды:

Холодная (X), прохладная (П), теплая (Т), умеренно горячая (УГ), горячая (Г)

(10.9 б) Угол поворота крана:

*Сильно вправо (–С), немного вправо (–Ср), не поворачивать (0),
немного влево (+Ср), сильно влево (+С)*

Области определения этих нечетких чисел и их функции принадлежности, не показанные на рис. 10.28 в, задают каждый раз для конкретных объектов и условий управления. Зависимость угла поворота от температуры определяется набором правил, которым соответствует нечеткая функция $\varphi^*(T)$:

- (10.10) Если вода холодная – сильно повернуть кран влево: $\varphi^*(X) = +C$
 Если вода прохладная – немного повернуть кран влево: $\varphi^*(П) = +Cp$
 Если вода теплая (комфортная) – не поворачивать кран: $\varphi^*(T) = 0$
 Если вода умеренно горячая – немного повернуть кран вправо: $\varphi^*(УГ) = -Cp$
 Если вода горячая – сильно повернуть кран вправо: $\varphi^*(Г) = -C$

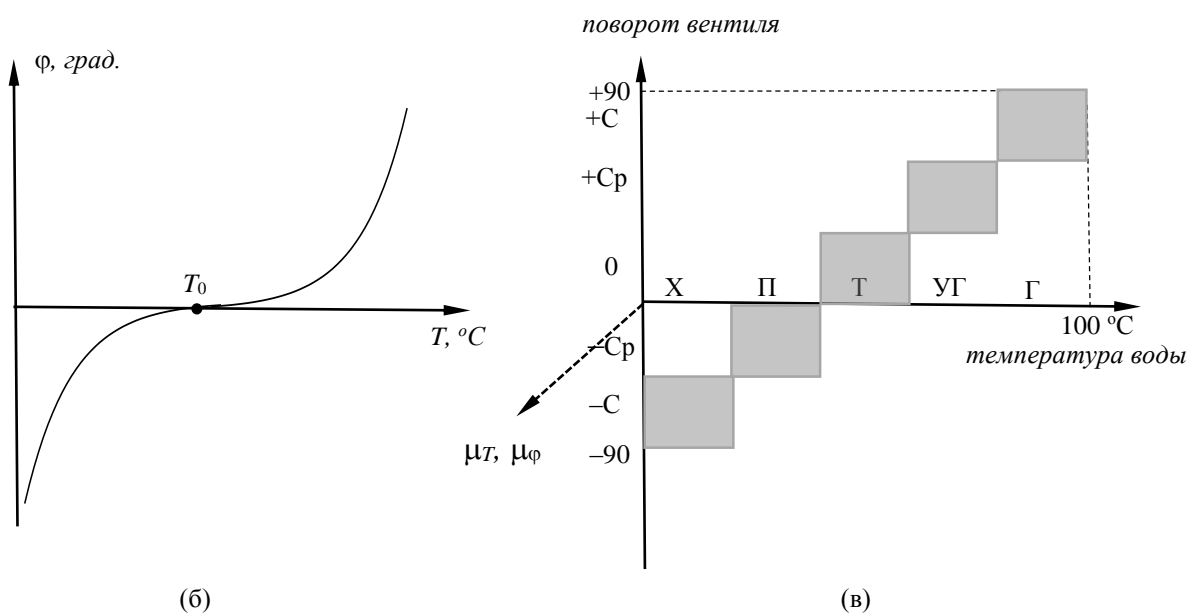
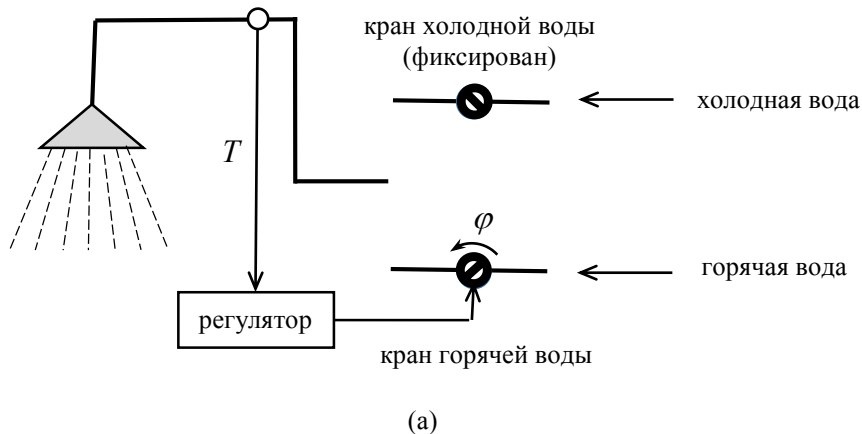


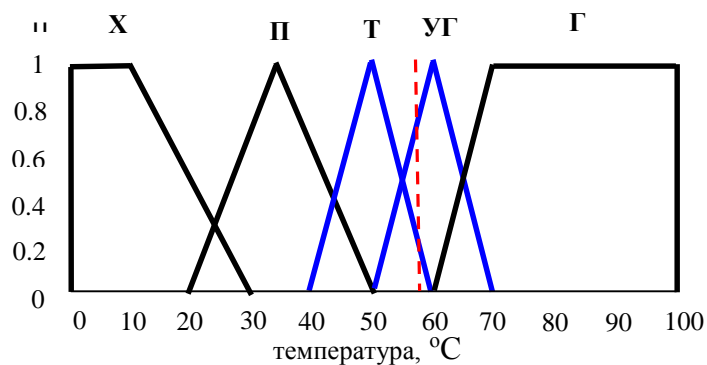
Рисунок 10.28. (а) Душ и нечеткий контроллер, схема. (б) Точная и (в) нечеткая зависимости угла поворота вентиля горячей воды от температуры

На рис. 10.28 в эту зависимость условно показывают квадраты серого цвета. Они образуют линейную цепочку, так как реальный вид зависимости «спрятан» в параметры нечетких чисел. Аналогично соотношениям тропической алгебры (см. разд. 7.8 в гл. 7), такая линейаризация упрощает задачу. Параметры системы (10.9 а, б), выраженные средствами естественного языка, называются *лингвистическими переменными*.

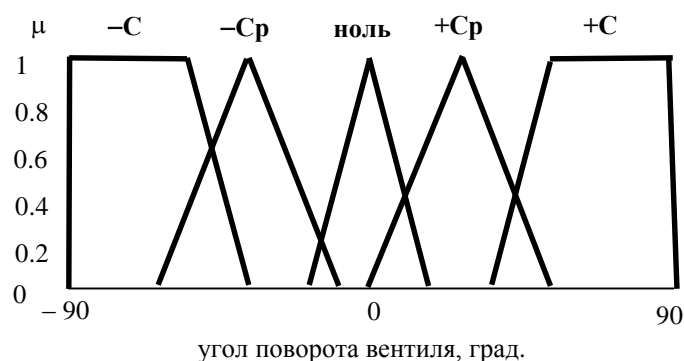
Вариант определения нечетких чисел (10.9 а, б) показан на рис. 10.29. Крайним значениям соответствуют трапецевидные числа, прочим треугольные. Нечеткий вывод управляющих воздействий (в данном случае точного угла поворота крана) по точному значению температуры проводится по следующей схеме.

Пусть измеренная температура воды в душе (белый кружок на рис. 10.28 а) равна 58 °С. Этому значению, показанному на рис. 10.29 а вертикальной штриховой линией, соответствуют два нечетких числа Т (теплая) и УГ (умеренно горячая), графики функции принадлежности которых линия пересекает. Точки пересечения указывают вклады этих чисел в «нечеткую» температуру:

(10.11 а) температура воды = 0.2·«теплая» \cup 0.8·«умеренно горячая»



(а)



(б)

Рисунок 10.29. Нечеткие значения (а) температуры воды, (б) угла поворота крана

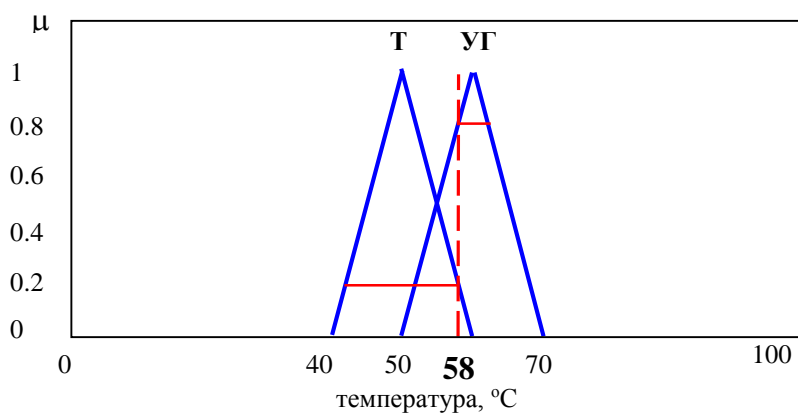
Таким образом, мы перевели температуру воды $T=58$ °С в нечеткую форму: произвели ее фаззификацию. Далее по правилам (10.10), задающим нечеткую функцию $\varphi^*(T)$, значение (10.11 а) надо перевести в нечеткий угол поворота крана. Это сделать легко: в нечеткую переменную «угол поворота», в соответствии с формулами (10.10), внесут вклад только ненулевые компоненты нечеткой температуры с весами, указанными в (10.11 а):

(10.11 б) угол поворота = 0.2·«ноль» \cup 0.8·«немного вправо».

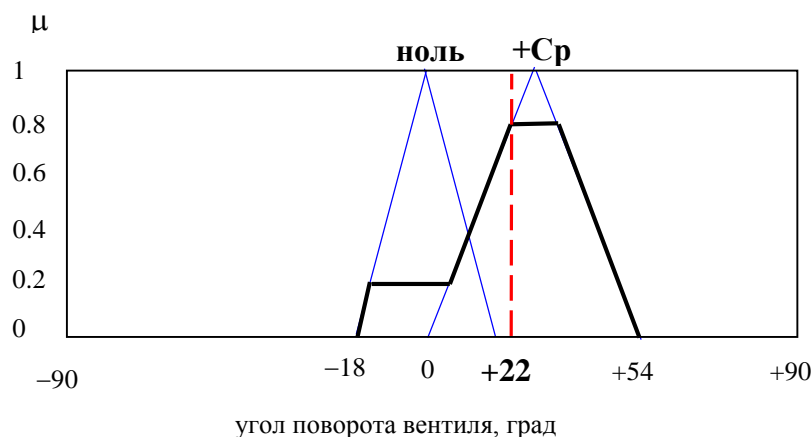
Обратим внимание, что «суммам» нечетких чисел соответствует объединение множеств. Перевод (10.11 а) в (10.11 б), т.е. процедуру нечеткого вывода, иллюстрирует рис. 10.30.

Последним шагом в выработке управления является дефаззификация: перевод нечеткого числа (10.11 б) в угол поворота вентиля. Для такого перевода в нечетком управлении используется несколько равноправных схем, дающих примерно одинаковые результаты. По наиболее популярному алгоритму Мамдани точная сумма двух нечетких

чисел А и В соответствует медиане функции их объединения $\mu_{A \cup B}$: линии, разделяющей фигуру под графиком объединенной функции принадлежности на две половины одинаковой площади (рис. 10.30 б).



(а)



(б)

Рисунок 10.30. (а) Определение вкладов нечетких значений температуры (фаззификация). (б) Объединение нечетких углов поворота вентиля $\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A, \mu_B)$ и нахождение среднего значения (дефаззификация)

Таким образом, схема нечеткого регулирования перевела «четкое» значение температуры воды в «четкую» величину угла, на который следует повернуть кран для понижения ее температуры:

$$58 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow +22 \text{ градуса дуги}$$

«Нечеткие» алгоритмы широко применяются в современных схемах управления. По терминологии, сложившейся в этой области, для значений нечетких параметров обычно используют такие символы:

- NB (negative big) – большое отрицательное
- NM (negative medium), либо просто N – отрицательное
- NS (negative small) – небольшое отрицательное
- ZE (zero) либо Z – нулевое

PS (positive small) – небольшое положительное
 PM (positive medium) либо P – положительное
 PB (positive big) – большое положительное

Так, например, в нечетком дискретном пропорционально-дифференциальном (PD) регуляторе (формула (10.4 а) при $k_2 = 0$) связь величины и знака управляющего воздействия u_{k+1} с величинами ошибки $e_k = Y_0 - Y_k$, где Y_0 – целевое значение функции выхода, и изменения ошибки на k -м шаге $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$ отражает таблица

Таблица 10.1

Величина управления в зависимости от ошибки и ее производной в нечетком PD-регуляторе.

		Δe	производная ошибки						
			<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>e</i>									
ошибка	<i>NB</i>		<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>
	<i>NM</i>		<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>
	<i>NS</i>		<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>
	<i>ZE</i>		<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
	<i>PS</i>		<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>
	<i>PM</i>		<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NB</i>
	<i>PB</i>		<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>

Первая строка в таблице задает нечеткие величины управления при большом отрицательном (*NB*) отклонении e_k от целевого выходного параметра и допустимых величинах производной $\Delta e_k = (e_k - e_{k-1})/1$ в единицу дискретного времени. В случае большой либо средней отрицательной производной (ошибка велика и продолжает быстро расти) требуется большое противоположное (положительное) воздействие, при малой производной – среднее положительное, при (примерно) постоянной ошибке малое положительное воздействие, при слабом или среднем уменьшении ошибки – не вмешиваться, при сильном уменьшении ошибки – слабое отрицательное управляющее воздействие. Прочие строки в таблице расшифровываются аналогично. Связи нечетких переменных по схемам, подобным (10.10) и табл. 10.1, в теории управления называются *продукционными правилами*.

Рассмотренные в этой главе простейшие формы роевого интеллекта и системы управления, примыкающие к интеллектуальным, обладают общими качествами. Роевой интеллект (составляющие единицы которого, как в рое роботов, могут не иметь собственного интеллекта) реализуется через связи между автономными агентами, по отдельности также воспринимающими внешнюю информацию, благодаря сочетанию хаотичности и взаимосвязи их индивидуальных действий. Это позволяет системе агентов гибко и успешно «вести себя» в изменяющейся внешней обстановке далеко за пределами возможностей отдельного агента – что обычно и полагают главным признаком РИ. С другой стороны, задачей автоматического управления и робототехники, подобно «целям» роя общественных насекомых, является успешное реагирование на огромное разнообразие внешних воздействий, которое невозможно изначально запрограммировать. При решении этой задачи уже в протоинтеллектуальных системах реализуются внесение в память агента образа окружающей действительности (картирование обстановки роботом) и свертка информации (нечеткое управление), математически заданные в пространстве представлений (belief space). В следующей главе мы увидим, что эти признаки характерны и для более сложных форм интеллекта.

Литература к разделу 10.3

¹⁵ Л.А. Заде, *Нечеткие множества*, Нечеткие системы и мягкие вычисления, 2015, т.10, № 1, 7 (перевод статьи 1965 г.)

¹⁶ см. http://fuzzy-group.narod.ru/files/Fuzzy_Modeling/Lection08.2.Fuzzy.inference.system.pdf

Рекомендуемая литература

1. В.Е. Кипятков. *Мир общественных насекомых*, 3-е изд. — М.: ЛИБРОКОМ, 2009.
2. Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников, Л.Б. Рапопорт, *Математическая теория автоматического управления: учебное пособие*. —М.: ЛЕНАНД, 2019.
3. Д.П. Ким, *Теория автоматического управления. Учебник и практикум для академического бакалавриата*, М.: Юрайт, 2019.
4. Е.Е. Ступина, А.А. Ступин, Д.Ю. Чупин, Р.В. Каменев, *Основы робототехники: учебное пособие*. — Новосибирск: Сибпринт, 2019.
5. В.Г. Чернов. *Основы теории нечетких множеств: учебное пособие*. Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2010.