

Слабо формальные системы

А. В. Чечкин

В статье рассматриваются исходные понятия теории слабо формальных систем. В настоящее время все более отчетливо проявляется понимание различия между кибернетическими и интеллектуальными системами. Главным отличием интеллектуальной системы (ИС) от кибернетической системы (КС) является ее способность решать неизвестные для ИС задачи, то есть способность к творчеству. При этом ИС синтезирует алгоритмы для решения неизвестных ей задач. КС решает только известные ей задачи, используя готовые для этого алгоритмы, так как КС сильно формализованная система. В ИС постоянно присутствует последствие, память о своем поведении и постоянное оценивание своего поведения, то есть рефлексия. В КС рефлексия отсутствует. ИС является принципиально слабо формализованной системой, для которой типичным является случай решения неизвестной для нее задачи. В математической информатике выделяются два направления исследования, теория сильно формальных систем и теория слабо формальных систем.

1. Две парадигмы математической информатики

Интеллектуальные системы различного типа и назначения изучает **математическая информатика** [1–3]. Выделим пять классов реальных ИС:

- 1) **Биологическая ИС** — интеллект человека, высшего животного,
- 2) **Автоматизированная ИС** — человеко-машинная система: атомный реактор, пилотируемый самолет, электростанция, роботизированное производство и т. д.,

- 3) **Искусственная ИС** — система, выполняющая функции естественной ИС и, в которой отсутствует человеческий фактор: спутниковая навигационная система, космическая беспилотная межпланетная станция и др.,
- 4) **Микроэкономическая ИС** — организационная система коллектива людей и других ИС, подчиняющихся административным командам: фирма, компания, армия, государство и т. д.,
- 5) **Макроэкономическая ИС** — среда из ИС, подчиняющихся правилам среды: рынок, интернет, игра и т. п.

Интеллектуальная система, в отличие от **кибернетической системы** характеризуется наличием **последствия**. ИС — это рефлексивная (немарковская) целенаправленная система, в которой происходят следующие процессы.

- Исходя из целевого назначения, ИС проводит **системный анализ** внешней предметной области, генерирует поток задач с приоритетами. С учетом своих возможностей ИС выбирает **доминирующую задачу** и классифицирует ее по признаку **известная — неизвестная**.
- Если задача **известная** для ИС, то ИС **решает ее** имеющимися средствами.
- Если задача **неизвестная** для ИС, то ИС организует **системный синтез** метода ее решения, **активирует** (реализует) спроектированный метод решения неизвестной задачи, **адаптирует** (корректирует) активированный метод с целью получения конечного результата.
- Успешно реализованный процесс решения неизвестной задачи ИС анализирует и **закрепляет** полученный опыт решения.
- Неудачная попытка решения задачи анализируется в ИС и ИС организует новую попытку решения вплоть до **расширения** допустимого для ИС класса задач.

В любой ИС можно различить два системных уровня, **рабочую подсистему** (РП) и **активирующую подсистему** (АП), рис. 1.

В РП находятся средства решения задач в форме среды **радиалов** (заготовок), отражающих предшествующий опыт решения за-

дач. Радикал — это **схема** из базовых элементов РП, снабженная **командным элементом**. Радикалы имеют два состояния, пассивное и активное.

АП, в зависимости от имеющегося опыта, оценивает доминирующую задачу и классифицирует ее по принципу **известная — неизвестная** для ИС. Для известной задачи АП активирует соответствующий задаче радикал и решает задачу. Для неизвестной задачи АП проектирует и синтезирует оперативную рабочую сеть (**системоквант**) из радикалов в РП для попытки решения этой задачи. АП контролирует ход решения задачи и корректирует системоквант в случае необходимости. После успешного решения задачи АП закрепляет опыт решения неизвестной задачи. В случае необходимости АП изменяет класс допустимых для ИС задач.

В связи с выделением в ИС двух подсистем РП и АП, в математической информатике выделяются две парадигмы.

I. Информационная парадигма информатики. *В ИС происходит сбор, хранение, преобразование и использование семантической информации о внешней предметной области.*

II. Рефлексивная парадигма информатики. *В ИС происходит сбор, хранение, преобразование и использование семантической информации о своем поведении (рефлексия).*

Первая парадигма лежит в основе **теории сильно формальных систем (кибернетических систем)**. Основными понятиями этой теории являются: понятия дискретной математики, алгоритм, автомат, задача, информация о точке, данные о точке, решетки и шкалы понятий, решетки и шкалы достоверностей, количество информации о точке, ультрамножество, гипертекстовая информация, продукция, канонический ультраоператор, матрица (ядро-таблица) канонического ультраоператора, информационная производная ультраоператора, тихоновский ультраоператор, локальные и распределенные базы данных и знаний и др. [1–3, 5].

Вторая парадигма положена в основу **теории слабо формальных систем (интеллектуальных систем)**, в которой изучаются в первую очередь вопросы **синтеза алгоритмов**, то есть вопросы управления своим поведением в зависимости от прошлого и настоящего опыта (последействие). Основными понятиями этой теории

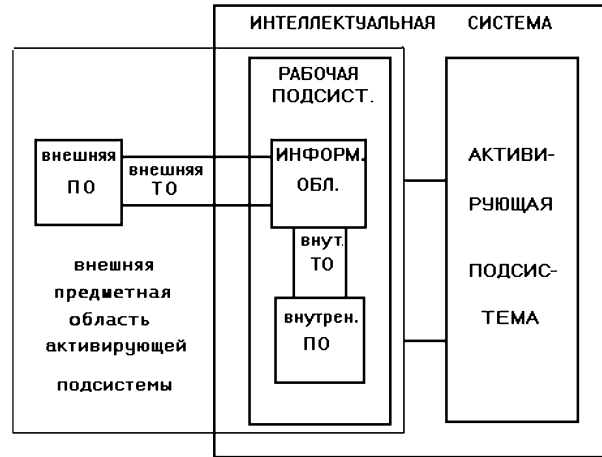


Рис. 1. Структура интеллектуальной системы.

являются: радикал РП, известная и неизвестная задача, системный анализ задачи, системный синтез алгоритма (системокванта РП) для неизвестной задачи, самоорганизация РП, адаптация системокванта РП, самообучение и саморасширение ИС [3, 4].

С точки зрения приложений теория сильно формальных систем описывает **кибернетические системы**, нацеленные на решение **известных** им задач для разных предметных областей, то есть системы, оснащенные алгоритмами решения таких задач. Теория слабо формальных систем описывает **интеллектуальные системы** различного назначения, предназначенные для решения как **известных** так и **неизвестных** им задач. При этом для неизвестных задач слабо формальная система синтезирует алгоритм их решения.

2. Базовые элементы интеллектуальных систем

Будем анализировать структурную организацию и поведенческие особенности ИС, исходя из базовых элементов ИС.

ГИПОТЕЗА о базовых элементах ИС. Все системные организации рабочей и активирующей подсистем ИС строятся из следующих базовых (однотипных) элементов ИС [1-3]:

Предметная область — некоторые **объекты и отношения** между ними.

Интеллектуальный датчик — подсистема сбора семантической информации о части объектов предметной области, образующих, так называемое, **опорное (объектное) множество** объектов данного **интеллектуального датчика**.

Интеллектуальный исполнитель — подсистема изменения части объектов предметной области, образующих **опорное (объектное) множество** объектов данного **интеллектуального исполнителя**.

Локальная база данных — подсистема хранения семантической информации об объектах некоторого опорного множества. Таким образом, локальная база данных всегда имеет свое опорное множество объектов предметной области внешних по отношению к ней. Основными понятиями теории локальных баз данных являются: *информация о точке, данные о точке, решетки и шкалы понятий, решетки и шкалы достоверностей, количество информации о точке, ультрамножество и др.* [1-3].

Локальная база знаний — подсистема преобразования семантической информации об объектах некоторой предметной области. Всякая локальная база знаний имеет свою предметную область, свои входную и выходную локальные базы данных и так называемую **ультрасистему**, специальную подсистему — преобразователь данных. Основными понятиями теории локальных баз знаний являются *продукция, ультраоператор, информационная производная ультраоператора и др.* [1-3].

Модель объектов и отношений предметной области — это система любой природы, аналог объектов и отношений предметной области. Адекватность модели определяется относительно соответствующих интеллектуальных датчиков. Эти датчики должны собирать одинаковую семантическую информацию

с сопоставимых внешних объектов, отношений и их моделей. Одни и те же объекты и отношения могут иметь в ИС серию (несколько) моделей разной адекватности. Модели в ИС образуют как бы **внутреннюю предметную область**, аналог внешней предметной области.

Дадим строгие определения.

Определение 1. Пусть имеется семейство множеств и семейство произвольных функциональных отношений между элементами некоторых из них. Такие два семейства назовем **внешней предметной областью (внешняя ПО)**. Для каждого из множеств первого семейства внешней ПО введем множество своих предметных переменных и констант, которое будем называть **опорным множеством**, соответствующим этому множеству внешней ПО. Для каждого из функциональных отношений второго семейства внешней ПО определим функциональные символы, которые будем называть **опорными операторами**. Все опорные множества и опорные операторы будем называть **внутренней ПО**, рис. 1.

Определение 2. Для каждого множества внешней ПО и тем самым соответствующего опорного множества внутренней ПО определим одно или несколько **ультрамножеств над этим множеством** [1–3]. Для некоторых ультрамножеств и соответствующих им множеств внешней ПО определим **сингулярные ультраоператоры**, отображающие множества в соответствующие им ультрамножества и назовем их **внешними интеллектуальными датчиками** [1–3]. Аналогично зададим сингулярные ультраоператоры, отображающие опорные множества в соответствующие ультрамножества и назовем их **внутренними интеллектуальными датчиками**.

Отметим, что с точки зрения математической логики задание ультрамножества соответствует заданию языка первого порядка. Множество внешней ПО соответствующее ультрамножеству является областью интерпретации языка, опорное множество является множеством предметных переменных и констант, соответствующие внешний и внутренний датчики обеспечивают интерпретацию предикатных символов языка. При этом элементами ультрамножества являются формулы языка вместе с их оценками достоверности. Те формулы, в которых присутствуют только предметные постоянные являются

данными о соответствующих предметах. Тем самым ультрамножество есть **локальная база данных** (ЛБД) о предметах соответствующего множества внешней ПО.

Определение 3. Для некоторых ультрамножеств и соответствующих им множеств внешней ПО зададим сингулярные ультраоператоры, отображающие ультрамножества в соответствующие им множества и назовем такие ультраоператоры **внешними интеллектуальными исполнителями** [1–3]. Аналогично зададим сингулярные ультраоператоры, отображающие некоторые ультрамножества в соответствующие им опорные множества и назовем их **внутренними интеллектуальными исполнителями**.

Определение 4. Для некоторых опорных операторов определим соответствующие им **ультраоператоры**, которые преобразуют данные входных ультрамножеств в данные выходных ультрамножеств. При этом получающиеся данные в выходных ультрамножествах называются **логическими следствиями** входных данных. Ультраоператоры являются **локальными базами знаний** (ЛБЗ) о соответствующих опорных операторах.

Определение 5. Все опорные множества и опорные операторы внутренней ПО, ультрамножества (ЛБД) и ультраоператоры (ЛБЗ), внешние и внутренние интеллектуальные датчики и исполнители называются **базовыми элементами**. При этом ультрамножества и ультраоператоры образуют **информационную область**, внешние интеллектуальные датчики и исполнители образуют **внешнюю терминальную область (внешняя ТО)**, внутренние интеллектуальные датчики и исполнители образуют **внутреннюю ТО**, рис. 1.

ЗАМЕЧАНИЕ об информационной области ИС. Базовые элементы ИС объединены в **сеть**, связывающую одни элементы с другими. С точки зрения математической логики информационная область представляет собой множество формул, объединенных в связанные между собой наборы. Всякое ультрамножество определяет свой набор **фактов (данных)**, а ультраоператоры представляют собой наборы **продукций (правил)**. Тем самым информационная область является **распределенной базой данных и знаний** о внешней ПО, то есть является **информационной моделью (картиной) внешней ПО**.

3. Радикалы интеллектуальных систем

Для того чтобы можно было управлять процессом решения задач и хранить опыт решения задач, базовые элементы организуются в **радикалы**. Радикалы отражают предыдущий опыт решения задач. Радикалы представляют собой **память о поведении ИС (ближнюю память ИС)** в отличие от **памяти о внешней ПО (дальней памяти ИС)**, которую представляют базовые элементы ИС.

ГИПОТЕЗА о командных элементах радикалов.

Каждый радикал определяется своим **командным элементом**, который имеет два состояния, пассивное и активное. Пассивное состояние командного элемента задает пассивные состояния всех базовых элементов радикала, а активное состояние командного элемента задает активные состояния всех базовых элементов радикала. Если базовый элемент входит в несколько радикалов, то для его активизации достаточно активизации одного из командных элементов радикалов, в которые он входит. Командные элементы радикалов по определению являются базовыми элементами рабочей подсистемы ИС. Тем самым возможны радикалы из командных элементов.

Таким образом, рабочая подсистема интеллектуальной системы есть **среда радикалов**. Перемена активности в среде радикалов по сути, означает переключение элементов в различные схемы, то есть **коммутацию** базовых элементов.

ИС в общем случае является многоуровневой (вложенной) системой, которая получается из простейшей ИС заменой некоторых ее базовых элементов на соответствующие им интеллектуальные подсистемы.

Рабочая подсистема ИС, то есть среда радикалов, распадается на три части (рис. 1).

Ультра среда (У-среда) — это информационная область, где хранится в базах данных и преобразуется в базах знаний семантическая информация.

Терминальная среда (Т-среда) — это сенсорная область, где происходит сбор и использование семантической информации.

Опорная среда (О-среда) — это область **моделей** внешней предметной области, то есть внутренняя предметная область для прогнозирования процессов во внешней предметной области и внутреннего экспериментирования.

О-среда ИС — это область моделей, аналогов внешней предметной области. Она предназначена для прогнозирования процессов вне ИС и внутренней эмпирической деятельности. Базовые элементы О-среды можно себе представить в виде аудио- и видео- записей, аналоговых и имитационных моделей, математических и компьютерных моделей, различного рода экспериментальных установок (аэродинамических труб, испытательных стендов, тренажеров и т. д.), эталонных и тестовых примеров (образцов, предметов, систем, процессов и т. д.)

У-среда ИС или информационная область предназначена для хранения и преобразования информации. Базовые элементы У-среды можно себе представлять в виде локальных баз данных и узко специализированных локальных баз знаний, ориентированных на соответствующие части внешней предметной области и О-среды.

Т-среда (внешняя и внутренняя) ИС — это сенсорная среда, которая предназначена для взаимодействия У-среды с внешней и внутренней предметными областями. Базовые элементы Т-среды можно себе представлять в виде датчиков и исполнителей (сенсорных элементов). Датчики снимают показания (данные) с объектов предметной области для соответствующих локальных баз данных У-среды. Исполнители обеспечивают выбор объектов и отношений внешней предметной области или конкретизацию моделей О-среды для проведения внутренних экспериментов по запросам из У-среды.

Дадим строгие определения.

Определение 6. **Радикалом** называется **схема из базовых элементов**, которая имеет **командный элемент**. Командный элемент радикала отвечает за два состояния радикала, **пассивное (свободное)** и **активное (рабочее)**. В пассивном состоянии все базовые элементы радикала не работают (блокированы), в активном состоянии все базовые элементы радикала работают. Если базовый элемент входит в несколько радикалов, то он работает тогда и только тогда, когда активен хотя бы один из этих радикалов. Будем считать,

что всегда для каждого базового элемента определен **атомарный радикал**, состоящий только из этого элемента и соответствующего командного элемента. Так как базовые элементы образуют сеть, то множество радикалов тоже образуют сеть, которую будем называть **средой радикалов** или **рабочей подсистемой (РП)**.

Перемена активности в среде радикалов означает переключение элементов в различные оперативные схемы (ансамбли), то есть **коммутацию** базовых элементов.

Определение 7. Среда радикалов распадается на три части. **Опорная среда (О-среда)** — это среда радикалов из элементов внутренней ПО. **Терминальная среда (Т-среда)** — это среда радикалов из (сенсорных) элементов внешней и внутренней ТО. **Ультра среда (У-среда)** — это среда радикалов из элементов информационной области. Тем самым определяются три типа радикалов **О-, У-, Т-радикалы**.

О-радикал представляет собой оперативную **модель** некоторой части внешней ПО. Активный О-радикал служит для прогнозирования процессов во внешней ПО и проведения оперативных внутренних экспериментов. Пассивный О-радикал является некоторой **семантической сетью**. Активный О-радикал позволяет осуществлять слежение за внешней ПО (принцип «гештальта», выбор «предметфон»). Он позволяет неоднократно повторять внутренний эксперимент в обычном, ускоренном, замедленном, обратном времени, делать стоп-кадр, получать новые данные и новые знания.

У-радикал является оперативной **экспертной системой**, предметно ориентированной распределенной базой данных и знаний в форме некоторой сети накопителей и преобразователей данных. Накопитель — это локальная база данных. Преобразователь или ультрасистема — это локальная база знаний.

Т-радикал является оперативной **контрольно-измерительной системой** в форме некоторой сети интеллектуальных датчиков и исполнителей.

В среде радикалов кроме О-, У-, Т-радикалов могут быть **комплексные радикалы**, которые определяются базовыми элементами, относящимися к разным средам.

Рабочая подсистема ИС представляет собой сеть **базовых элементов**. Эти элементы объединены в **ансамбли (оперативные схемы)**, названные **радикалами**. Радикалы отражают предыдущий опыт решения задач. Различные радикалы могут иметь одни и те же элементы. Радикалы могут находиться в двух состояниях, **пассивном (свободном) и активном (рабочем)**. Эти состояния определяются активирующей подсистемой. Базовые элементы одного радикала либо **все** пассивны, либо **все** активны.

ЗАМЕЧАНИЕ о компьютерных сетях и об интернете. В настоящее время в практической информатике наметилась тенденция организации сред радикалов на основе информационных сетей и в первую очередь сети **интернет**. Такие среды включают большое число профессионально ориентированных локальных баз данных и локальных баз знаний, экспертных систем, многочисленные модели разнообразных предметных областей. Тем самым такая сеть представляет собой рабочую подсистему, а пользователи такой сети выступают в роли активирующей подсистемы соответствующей глобальной ИС. Работу в сети можно организовать по-разному. Например, по типу WORKFLOW-систем, когда один пользователь (организатор-менеджер) со своими программными средствами выступает в роли активирующей подсистемы, а остальные пользователи участвуют, как интеллектуальные исполнители рабочей подсистемы (рис. 1).

4. Системокванты интеллектуальных систем

Понятие **системокванта** в физиологии и психологии ввел К. В. Судаков [4] в развитие и уточнение теории **функциональных систем** П. К. Анохина. Системоквант определяется как целенаправленная физиологическая подсистема живого существа, объединяющая работу нескольких органов этого существа. Системоквант активируется для удовлетворения конкретной потребности живого существа и вызывает соответствующие поведенческие акты со стороны этого живого существа. Наличие системоквантов наблюдается у всех живых существ.

Определение 8. Сеть тех базовых элементов рабочей области ИС, которые относятся к активированным радикалам назовем **системоквантом** среды радикалов.

ГИПОТЕЗА о потенциалах активности радикалов и самоорганизации в среде радикалов. Если задача неизвестная, то АП в зависимости от задачи и с учетом имеющегося опыта, вырабатывает проект алгоритма решения задачи (**синтез**) в форме распределения **потенциалов активности радикалов** или вероятностной меры в среде радикалов. Далее радикалы с наибольшим потенциалом активности активируются (**активация**). Из активных радикалов образуется начальная рабочая сеть, **системоквант**, для попытки решения требуемой задачи. Такой системоквант представляет собой оперативную **кибернетическую систему**, которая является тактической для решения выбранной задачи. **Результат** решения задачи системоквантом оценивается в активирующей подсистеме ИС. Если задача не решена, то происходит самонаращивание системокванта по заданным правилам с учетом потенциалов активности радикалов и продолжается решение задачи расширенным системоквантом. Попытка решения задачи, то есть процесс функционирования системокванта и его саморасширение происходит в режиме **самоорганизации ИС**.

Вмешательство активирующей подсистемы ИС в процесс самоорганизации с целью коррекции потенциала активности радикалов, то есть поиск новой более успешной (эффективной) попытки решения является **адаптацией** ИС. После успешного или неуспешного решения задачи происходит анализ процесса решения и активирующая подсистема, если надо, меняет радикалы (**самообучение**) и базисные элементы (**саморасширение**).

Каждый радикал среды может находиться в одном из двух состояний, пассивном или активном. Активное состояние означает готовность радикала к выполнению работы. Например, активный У-радикал означает состояние готовности к обработке им запроса. Активный О-радикал означает состояние проведения внутренних экспериментов, например, имитационного моделирования и т. д. Активный Т-радикал означает состояние проведения контрольно-измерительных работ и работ по управлению определенной частью объектов внешней предметной области или О-среды.

Активацию в среде радикалов вызывает активирующая подсистема интеллектуальной системы в форме своеобразного приказа радикалам с наибольшим потенциалом активности решить задачу. В среде радикалов появляется начальный активный участок, начальный системоквант рабочей среды. В системокванте происходит попытка решения этой задачи, то есть подготовка ответа на запрос или выполнение приказа. Промежуточные результаты решения оцениваются. Если задача не решена, то происходит потактовое самонаращивание начального системокванта сети другими радикалами из пассивных с учетом потенциалов активности по определенным правилам **самоорганизации** и продолжается выбранная попытка решения задачи. Происходит процесс распространения активности в среде радикалов. Самоорганизация ИС — это попытка решения задачи.

Активирующая подсистема может сменить попытку решения задачи, то есть вмешаться в процесс самоорганизации. Например, она изменяет распределение потенциалов активности радикалов и тогда процесс самоорганизации в среде радикалов пойдет по-другому. Происходит **адаптация** ИС и корректировка распространения активности в среде радикалов.

Адаптация ИС — это корректировка процесса самоорганизации ИС со стороны активирующей подсистемы.

После завершения работы системокванта каждый раз **активирующая подсистема** оценивает промежуточный результат и вырабатывает установку на продолжение попытки решения задачи (**самоорганизация**) или на изменение (**адаптация**) попытки решения. В случае успешного завершения решения задачи, происходит анализ всех попыток (удачных и неудачных), решения задачи происходит изменение радикалов (**самообучение**). В рабочей подсистеме происходит рождение и уничтожение радикалов (учет опыта). Затем интеллектуальная система переходит в пассивное состояние. Если системоквант охватывает все базовые элементы ИС, то есть появляется максимально большой системоквант и задача не будет решена, то активирующая подсистема вырабатывает установку на **саморасширение** ИС. После чего ИС переходит в режим саморасширения, то есть построения новых и изменения старых базовых элементов. Тем самым изменяется **класс** допустимых задач ИС. Затем процесс решения задачи снова возобновляется. И так далее.

Самообучение ИС — это режим изменения радикалов, в котором не появляются новые и не уничтожаются старые базовые элементы, а появляются новые и уничтожаются старые схемы из имеющихся базовых элементов. Происходит закрепление **опыта**, привитие **навыков**, получение **эвристик**, которые будут использоваться в дальнейшем при самоорганизации ИС.

Саморасширение ИС — это режим эволюции ИС, изменения внешней и внутренней предметных областей, пополнения старых и получение новых знаний и данных, то есть создание новых и уничтожение старых базовых элементов ИС.

ЗАМЕЧАНИЕ о теории функциональных систем. В физиологии и психологии процессы функционирования активирующей подсистемы изучаются в **теории функциональных систем** П. К. Анохина [4]. При этом

- **афферентный синтез** в теории функциональных систем соответствует процессу **системного анализа**,
- **принятие решения** в теории функциональных систем соответствует процессу **внутреннего проектирования**,
- **эфферентный синтез** в теории функциональных систем соответствует процессу **активации**,
- **акцептор результатов действия** в теории функциональных систем соответствует процессу **адаптации**.

В теории функциональных систем процессы самообучения и саморасширения изучаются без выделения специфических этапов функционирования [4].

ЗАМЕЧАНИЕ о теории исследования операций. В формулировках процессов, происходящих в активирующей подсистеме, нашла свое отражение теория и практика организационных и автоматизированных ИС различного назначения. При этом главный вклад внесла практика и теория проектирования сложных человеко-машинных и технических систем, управления проектами, в том числе, практика и теория управления войсками и оружием. Эта область знаний объединяется термином **теория исследования операций и принятие решения** [5].

5. Функционирование интеллектуальных систем

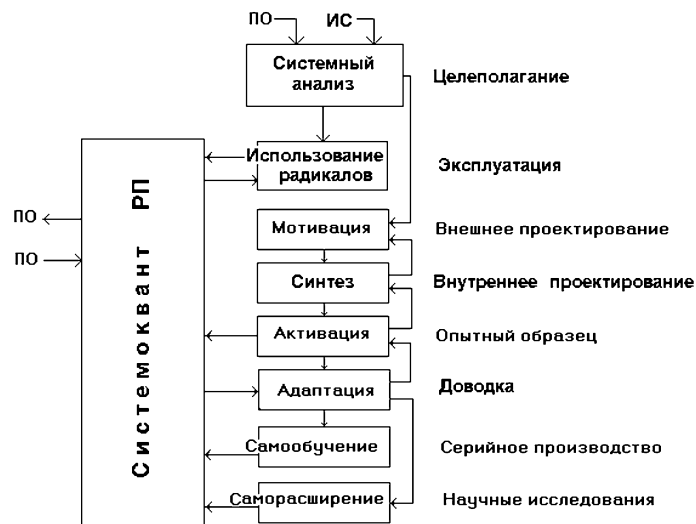


Рис. 2. Функционирование интеллектуальной системы.

Рассмотрим подробнее этапы функционирования ИС. В ИС происходят следующие взаимодействующие процессы, рис. 2.

- 1) **Системный анализ.** Оценивание и прогнозирование с позиции **целевого назначения ИС** состояний внешней ПО и возможностей (базовых элементов и радикалов) ИС. Выработка требований (потока задач с приоритетами) для ИС. Выбор доминирующей задачи. Классификация доминирующей задачи по принципу **известная — неизвестная** задача для ИС. Этот процесс является **целеполаганием** ИС.
- 2) **Эксплуатация радикалов.** Если задача известная, то происходит активирование радикала РП соответствующего этой задаче и решение задачи.
- 3) **Мотивация.** Если задача неизвестная, то происходит проблемный анализ условий задачи с учетом имеющихся радикалов (опыта) и ограничений к сложности (затрат) будущего си-

стемокванта. Тем самым происходит обоснование и выработка **тактико-технического задания (ТТЗ)** на системоквант. Этот процесс можно назвать **внешним проектированием** системокванта.

- 4) **Синтез.** Разработка **метода и алгоритма** решения задачи с требуемой эффективностью на основе имеющихся радикалов (заготовок). Тем самым происходит создание **проекта** системокванта. Этот процесс можно назвать **внутренним проектированием**.
- 5) **Активация (самоорганизация среды радикалов).** Реализация алгоритма решения задачи в форме системокванта в режиме самоорганизации среды радикалов. Этот процесс можно назвать созданием **опытного образца** системокванта.
- 6) **Адаптация.** Корректировка системокванта с учетом оценивания хода решения задачи. Если надо, то проведение новой попытки решения задачи в режиме самоорганизации. Этот процесс можно назвать **доводкой (отладкой)** системокванта.
- 7) **Самообучение.** В случае успешного решения неизвестной задачи, АП закрепляет полученный опыт в форме создания из системокванта **нового радикала**, ориентированного на данную задачу. При каждом последующем решении той же задачи АП имеет дело уже с известной задачей, для которой имеется готовый радикал (алгоритм) ее решения. Этот процесс можно назвать **серийным производством** системокванта в форме радикала.
- 8) **Саморасширение.** В случае безуспешных попыток решения задачи, АП анализирует причины неудачи и организует создание **новых** базовых элементов в среде радикалов и тем самым расширяет класс допустимых задач для ИС. Этот процесс можно назвать **научными исследованиями**.

ЗАМЕЧАНИЕ о системном синтезе в ИС. Процессы мотивации, синтеза, активации и адаптации связаны с эффективным решением неизвестной для ИС задачи, то есть с творчеством ИС. Эта группа процессов осуществляет **системный синтез** в ИС, в результате которого в ИС создается **системоквант РП**, то есть новая сильно формальная (кибернетическая) система.

ЗАМЕЧАНИЕ об оптимизации радикалов. При повторных решениях известной задачи в режиме эксплуатации с учетом изменившейся РП и внешней предметной области АП регулярно предъявляет требование пересмотра радикала. Например, требование уменьшения **сложности** (затрат) соответствующего радикала. В этом случае такая задача снова объявляется неизвестной и проходит весь цикл от внешнего проектирования до решения. В случае успешного решения такой задачи, например, уменьшения сложности модифицированного системокванта, АП уничтожает старый и создает новый радикал. Тем самым при повторных решениях задачи происходит **оптимизация (модификация) радикалов**.

ЗАМЕЧАНИЕ о генетическом алгоритме. Радикалы рабочей подсистемы ИС являются своего рода популяцией особей специального типа, носителей генной информации. Процесс самообучения ИС в таком случае представляет собой смену популяции. При такой смене происходит закрепление полезной для ИС информации. Рождение и уничтожение радикалов происходит по правилам алгебры радикалов (объединение, пересечение, разность радикалов). Главная особенность самообучения ИС состоит в предварительном анализе и оценивании возможных изменений в среде радикалов с использованием моделей и методов прогноза и только после этого происходит рождение и уничтожение радикалов. Идея обучения в рамках генетических алгоритмов состоит в том, что рождение и уничтожение особей в популяции происходит случайным образом и далее происходит отбор из них тех, которые выдерживают испытания. В генетических алгоритмах господствует идея **естественного отбора** Дарвина. В ИС этот отбор осуществляется внутри ИС на моделях при решении задачи синтеза системокванта до реального поведенческого акта ИС. Тем самым в ИС реализуется идея **оптимального отбора**, то есть отбора с предварительным оцениванием проектируемых вариантов и принятием решения активирующей подсистемой.

ЗАМЕЧАНИЕ о кибернетической системе. Теория интеллектуальных систем должна охватывать все классы ИС. С информационной точки зрения ИС различного типа и назначения функционируют и устроены **одинаково**. Внешние различия ИС в **специализациях**, то есть в **классах** допустимых видов **задач**, а внутренние различия в **способах** решения **известных и неизвестных** задач. Если ИС спе-

циализируется на решении только **известных ей задач**, то такую простейшую ИС называют **кибернетической системой**. В кибернетических системах нет необходимости в активирующей подсистеме. Поэтому такие системы естественно называть сильно формализованными системами.

ЗАМЕЧАНИЕ об определении интеллекта. Определим **интеллект**, как бинарное отношение частичного порядка (сравнение по интеллекту) на множестве всех ИС. Для сравнения по интеллекту можно всегда считать, что две ИС имеют одно и то же множество допустимых задач. При этом задачи, которые данная ИС не умеет решать, оценивают бесконечным временем решения. Если ИС-1 решает некоторую задачу быстрее другой ИС-2 при прочих равных условиях (энергетических, материальных, финансовых и т. п.), то будем говорить, что ИС-1 **эффективнее** решает данную задачу, чем ИС-2. Если ИС-1 решает все задачи не менее эффективно, чем ИС-2, то ИС-1 называется **не менее интеллектуальной**, чем ИС-2. Если при этом найдется хотя бы одна задача, которую ИС-1 решает эффективнее, чем ИС-2, то говорят, что ИС-1 **интеллектуальнее**, чем ИС-2. Очевидно, не любые две ИС сравнимы по интеллекту.

6. Слабо формальная система

Определение 9. Пусть имеется сеть базовых элементов и семейство \mathcal{D} (Дано), объединяющее некоторые, может быть пустые, множества выделенных **предметов и функциональных отношений** внешней ПО, множества выделенных **предметных постоянных и опорных операторов** внутренней ПО, множества выделенных **данных** выделенных ультрамножеств информационной области. Кроме \mathcal{D} имеется семейство \mathcal{H} (Найти) выделенных **ультрамножеств информационной области**. Тогда пара $\langle \mathcal{D}, \mathcal{H} \rangle$ называется **задачей** для сети базовых элементов. **Процессом решения задачи** называется получение в выделенных ультрамножествах таких данных, которые являются логическими следствиями из \mathcal{D} . При этом полученные данные называются **результатом** решения задачи.

Определение 10. Пусть сеть базовых элементов организована в форме среды радикалов. **Администрацией** для данной среды ра-

радикалов назовем **систему анализа, синтеза, управления и реструктуризации**, для которой объектом анализа является задача, объектом синтеза и управления является **системоквант** среды радикалов, объектом реструктуризации является среда радикалов. При этом управляющим воздействием на объект управления является **структура системокванта**, реакцией объекта управления на управляющее воздействие является промежуточный результат решения задачи. Целевым назначением администрации среды радикалов является получение конечного результата решения задачи с учетом прошлого опыта, то есть возможностей среды радикалов. Администрация вместе со средой радикалов называется **слабо формальной системой (СФС)**, рис. 1.

Определение 11. Задача называется **известной** для СФС, если в СФС имеется готовый алгоритм ее решения в форме радикала. В противном случае задача называется **новой** или **неизвестной** для СФС.

В случае известной задачи для СФС синтезированным системоквантом будет соответствующий задаче радикал. Для решения новой задачи в СФС синтезируется алгоритм ее решения для имеющихся входных данных задачи в форме системокванта в режиме проб и ошибок.

ЗАМЕЧАНИЕ о СФС. В интеллектуальной системе имеется этап целеполагания, то есть генерирование потока требований с приоритетами и затем выделение доминирующей задачи, рис. 2. Отличие СФС от интеллектуальной системы состоит в том, что СФС не генерирует задачи, а только решает поступившую к ней задачу. СФС является только **решателем** задач.

ЗАМЕЧАНИЕ о сетях Петри. В математической информатике удобным языком среды радикалов является расширенный язык сетей Петри [1–3]. При этом по всякой задаче в сетевой модели среды радикалов ИС выделяется **ассоциированная подсеть** и в ней две разметки, начальная и финальная. Начальная разметка определяется исходными данными задачи, финальная разметка определяется искомыми данными задачи. Ассоциированная подсеть соответствует начальному проекту системокванта, то есть начальному методу решения задачи. Проблема результативности метода и эффективности

алгоритма решения задачи сводится к проблеме **достижимости** из начальной разметки финальной разметки в выделенной подсети.

Определение 12. В рамках сетевой модели среды радикалов при помощи сетей Петри возможны следующие случаи:

- **Известная задача для СФС.** Финальная разметка достижима из начальной разметки и ассоциированная подсеть является сетевой моделью радикала.
- **Неизвестная легкая задача для СФС.** Финальная разметка достижима из начальной разметки, то есть для решения требуется одна попытка, но ассоциированная подсеть не является сетевой моделью какого-либо радикала.
- **Неизвестная трудная задача для СФС.** Финальная разметка не достижима из начальной разметки для ассоциированной подсети. При этом в среде радикалов существует системоквант, для которого сетевой моделью будет расширение ассоциированной подсети, и финальная разметка для нее будет достижима из начальной разметки. Тем самым для решения задачи потребуется несколько попыток наращивания начальной ассоциированной сети.
- **Не решаемая задача без расширения СФС.** Финальная разметка не достижима из начальной разметки для любого наращивания начальной ассоциированной подсети. Требуется расширение среды радикалов или изменение задачи.

ВЫВОД о проблеме НЕ АЛГОРИТМА. По-видимому, процесс функционирования СФС в общем случае не является **алгоритмическим**. Построение математической модели ИС потребует изучения нового математического понятия, **слабо формальной системы** (СФС). Главной особенностью такой системы является:

- 1) **синтез алгоритма (системокванта)** в зависимости от конкретной неизвестной для СФС задачи и в рамках имеющихся средств решения этой задачи,
- 2) **реструктуризация среды радикалов**, то есть **самообучение** слабо формальной системы, пополнение слабо формальной системы опытом, навыками успешного решения неизвестных за-

дач и **саморасширение** слабо формальной системы для решения нового класса задач. Слабо формальная система должна быть открытой системой и иметь **внешнее дополнение**.

ГИПОТЕЗА о частичном алгоритме. По видимому, в СФС потребуется ввести понятия **частичного алгоритма** для частных входных данных задачи и **замыкания частичных алгоритмов**, как перехода к **общему (единому) алгоритму** для всего множества входных данных задачи. Для алгоритмически неразрешимой задачи должен наблюдаться неустранимый бесконечный рост сложности предельного единого алгоритма. Для любой задачи в СФС, в частности, алгоритмически неразрешимой задачи, в случае конкретных входных данных $\langle D, H \rangle$, по видимому, существует расширение (внешнее дополнение) среды радикалов СФС до такого состояния, что в расширенной СФС будет существовать частичный алгоритм решения этой конкретной задачи.

7. Проблемы математической информатики

- ПРОБЛЕМА ЦЕЛЕПОЛАГАНИЯ ИС. *Каковы принципы оценивания предметной области ИС и генерации новых требований к ИС с учетом назначения ИС?*
- ПРОБЛЕМА ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИКАЛОВ. *Каковы принципы оценивания эффективности имеющихся радикалов?*
- ПРОБЛЕМА МОТИВАЦИИ. *Каковы принципы обоснования достаточного (минимального) числа тактико-технических требований к системокванту ИС?*
- ПРОБЛЕМА СИНТЕЗА нового алгоритма. *Каковы принципы и средства проектирования системокванта с заданными требованиями?*
- ПРОБЛЕМА АКТИВАЦИИ СИСТЕМОКВАНТА. *Каковы принципы самоорганизации рабочей области ИС?*
- ПРОБЛЕМА АДАПТАЦИИ ИС. *Каковы принципы оценивания и коррекции системокванта?*

- ПРОБЛЕМА ПАМЯТИ ИС. *Каковы принципы оценивания системокванта и сохранения его в качестве нового радикала?*
- ПРОБЛЕМА ЭВОЛЮЦИИ. *Каковы принципы саморасширения ИС?*
- ПРОБЛЕМА НЕ АЛГОРИТМА. *Существуют ли алгоритмически неразрешимые задачи, которые решаются в рамках СФС (слабо формальных систем)?*

Список литературы

- [1] Чечкин А. В. Математическая информатика. М.: Наука, 1991.
- [2] Чечкин А. В. Принципы и методы математического моделирования интеллектуальных систем // Интеллектуальные системы. Т. 3. Вып. 1–2. 1998. С. 63–83.
- [3] Чечкин А. В. Синергетический принцип и основные понятия математической информатики // Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы. М.: ВИНТИ, 1999. № 4. С. 14–22.
- [4] Судаков К. В. Теория функциональных систем. М., 1996.
- [5] Надежность и эффективность в технике. Справочник в десяти томах. Эффективность технических систем (том 3). М.: Машиностроение, 1988.