

Л. А. Гладков, В. В. Курейчик,  
В. М. Курейчик, П. В. Сороколетов

БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ  
МЕТОДЫ  
В ОПТИМИЗАЦИИ



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2009

УДК 681.3.001.63  
ББК 74.263.2  
Б 63



*Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту 08-01-07107,  
08-01-02008*

Авторский коллектив:  
Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.,  
Сороколетов П.В.

**Биоинспирированные методы в оптимизации.** — М.: ФИЗМАТЛИТ,  
2009. — 384 с. — ISBN 978-5-9221-1101-0.

Данная монография обобщает материалы зарубежных и российских ученых и результаты исследований авторов в указанных областях. Представлен единый подход к построению искусственных интеллектуальных иерархических систем, основанный на современных исследованиях в таких областях науки об искусственном, как гомеостатика, синергетика и эволюционное моделирование. Описаны способы построения иерархических искусственных интеллектуальных систем для решения оптимизационных задач принятия решений на графах. Рассмотрены алгоритмы анализа и синтеза оптимизационных задач принятия решений на графах.

Для специалистов, ведущих разработки перспективных интеллектуальных информационных технологий в науке, технике, экономике, а также для аспирантов и студентов всех специальностей, изучающих теорию систем и методы системного анализа, информатику, методы оптимизации, исследования операций и принятия решений.

ISBN 978-5-9221-1101-0

© ФИЗМАТЛИТ, 2009  
© Коллектив авторов, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Предисловие . . . . .                                                                                                   | 5          |
| Введение . . . . .                                                                                                      | 7          |
| <b>1. Гомеостатические, синергетические и эволюционные модели принятия решений . . . . .</b>                            | <b>19</b>  |
| 1.1. Анализ установления порядка и хаоса в моделях искусственных систем. . . . .                                        | 19         |
| 1.2. Использование элементов и основных принципов гомеостатики в искусственных системах . . . . .                       | 42         |
| 1.3. Эволюционные методы и генетические алгоритмы в искусственных системах . . . . .                                    | 55         |
| 1.4. Модели и архитектуры эволюции. . . . .                                                                             | 101        |
| 1.5. Заключение . . . . .                                                                                               | 125        |
| <b>2. Нестандартные архитектуры генетического поиска . . . . .</b>                                                      | <b>127</b> |
| 2.1. Постановка оптимизационных задач принятия решений. . . . .                                                         | 127        |
| 2.2. Перспективные технологии генетического поиска для решения оптимизационных задач . . . . .                          | 162        |
| <b>3. Оптимизационные задачи принятия решений на графах . . . . .</b>                                                   | <b>179</b> |
| 3.1. Анализ генетических алгоритмов разбиения графов на основе моделей искусственных систем . . . . .                   | 179        |
| 3.2. Генетические подходы для размещения вершин графов . . . . .                                                        | 198        |
| 3.3. Построение интегрированного алгоритма размещения фрагментов БИС . . . . .                                          | 209        |
| 3.4. Решения задач о коммивояжере методами моделирования эволюций. . . . .                                              | 235        |
| 3.5. Жадные эвристики для решения задач раскраски, изоморфизма, построения клик и независимых множеств графов . . . . . | 254        |
| 3.6. Выделение независимых и доминирующих подмножеств в графе на основе эволюционных процедур. . . . .                  | 271        |
| 3.7. Разработка комбинированного генетического алгоритма построения дерева Штейнера. . . . .                            | 292        |
| 3.8. Решение задачи упаковки блоков при помощи алгоритма генетического поиска с миграцией. . . . .                      | 306        |

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.9. Квантовый алгоритм решения оптимизационных задач . . . . .                                   | 319 |
| 3.10. Бионический алгоритм определения максимальных паросочетаний<br>в двудольном графе . . . . . | 330 |
| 3.11. Генетический алгоритм планаризации графов . . . . .                                         | 338 |
| 3.12. Нечеткие генетические алгоритмы решения задач оптимизации<br>и проектирования . . . . .     | 353 |
| Заключение . . . . .                                                                              | 369 |
| Список литературы . . . . .                                                                       | 371 |
| Аббревиатуры . . . . .                                                                            | 378 |

Наше знание — накопленная мысль  
и опыт бесчисленных умов.

*Р. Эмерсон*

## Предисловие

Моделирование развития и совершенствование природы позволяет перейти к построению интеллектуальных систем. Все, даже наиболее сложные структуры интеллектуальных искусственных систем, строятся на основе дискретности, на некоей общей основе. Дискретность возможных интеллектуальных систем, прежде всего, связана с движением и развитием живого. Существует особый строительный блок — «универсальный кирпич», который затем достраивается, входит в сложные иерархические конгломераты по нескольким нечетким алгоритмам. Универсальные строительные блоки имеют фрактальное строение и повторяются в различных масштабах.

Итак, природа имеет внутренние предпочтения к определенным формам естественных систем. Они неустойчивы и быстро эволюционируют к устойчивым формам, т. е. установлению гомеостаза. Относительно устойчивые структуры, на которые неизбежно выходят процессы эволюции в открытых и нелинейных системах, самоорганизуются. Процессы самоорганизации являются ключевыми понятиями новой, бурно развивающейся науки — синергетики. Синергетический взгляд на мир — взгляд эволюционный.

На упрощенных математических моделях можно видеть все разнообразие возможных путей эволюции. Эволюция имеет сквозной характер. Она пронизывает все уровни естественных и искусственных систем. Основой эволюции является отбор на основе стратегии — «выживают сильнейшие». Такое развитие через хаос — это медленный путь эволюции природы, путь случайных вариаций и эволюционного отбора, постепенного перехода от простых самоорганизующихся систем к все более сложным.

При этом природа часто делает скачки, осуществляя сжатие времени эволюции. Один из основных вопросов синергетики — это изучение взаимодействия части и целого. Это связано с проблемой совместной эволюции и ее ускорения при объединении эволюционирующих частей. Способы самоорганизации не произвольны, а обусловлены нелинейными свойствами внешней среды.

Основываясь на исследованиях в таких областях науки об искусственном, как гомеостатика, синергетика и эволюционное моделирование, авторы описывают триединый подход к построению искусственных интеллектуальных иерархических систем. Рассмотрены алгоритмы анализа и синтеза оптимизационных задач принятия решений на графах. В монографии мы обобщили материалы зарубежных и российских ученых и результаты своих исследований в указанных областях. Описаны

способы построения иерархических искусственных интеллектуальных систем для решения оптимизационных задач принятия решений на графах.

Данные исследования основаны на работах Н. Винера, И. Пригожина, Г. Хакена, Д. Холланда, Д. Гольдберга, Д. Гудмана, О. Ларичева, Д. Поспелова, В. Вагина, В. Емельянова, А. Еремеева, Ю. Горского, Н. Моисеева, А. Колесникова, Д. Батищева, Г. Осипова, Э. Попова, И. Норенкова и многих других российских и зарубежных ученых. Исследования авторов проводились в научной школе Таганрогского Технологического института Южного федерального университета (ЮФУ) по генетическим алгоритмам и эволюционному моделированию. Авторы благодарны аспирантам и сотрудникам кафедры САПР ЮФУ С. Баринову, А. Лежебокову, Р. Потарусову, Л. Балюк, М. Бакало, А. Кажарову, Р. Калашникову за помощь при реализации биоинспирированных алгоритмов и квалифицированные вычислительные эксперименты, показавшие преимущества этих алгоритмов при решении задач оптимизации.

Монография предназначена для специалистов, ведущих разработки перспективных интеллектуальных информационных технологий в науке, технике, экономике. Она может быть полезна для аспирантов и студентов всех специальностей, изучающих теорию систем и методы системного анализа, информатику, методы оптимизации, исследования операций и принятия решений.

Список используемых обозначений (аббревиатур) приведен в конце книги.

Книга, наверно, не свободна от недостатков, поэтому все замечания, предложения и пожелания будут с благодарностью приняты: [kur@tsure.ru](mailto:kur@tsure.ru); [leo@tsure.ru](mailto:leo@tsure.ru); [vkur@tsure.ru](mailto:vkur@tsure.ru).

*Авторы*

Книга печатается при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-01-07107).

Искусство обладает способностью изменять события; наука — предвидеть их. Явления, с которыми мы имеем дело, покоряются искусству, но предсказываются наукой.

*Г. Бокль*

## **Введение**

Одна из основных проблем в науке и технике сегодня — это разработка теории, принципов математических методов и моделей для эффективного принятия решения. При этом важными задачами являются: построение интеллектуальных искусственных систем (ИИС) поддержки принятия решений; моделирование принципов эволюционного развития природы; адаптация и взаимодействие с внешней средой; исследование открытых систем; построение порядка из хаоса; поддержание гомеостаза в искусственных системах; иерархическая самоорганизация.

Основным языком ИИС является математический аппарат системного анализа, теории сложных систем, графов и множеств. Способность формировать математические структуры и оперировать с ними — краеугольный камень человеческого интеллекта. Математические модели и алгоритмы — это те формы, в которых синергетика и теория искусственного интеллекта (ИИ) описывают знания об интеллектуальных процессах в науке об искусственном.

Одним из видов интеллектуальной деятельности является реализация расплывчатых алгоритмов лицом, принимающим решение (ЛПР). Главным помощником при этом стали интеллектуальные искусственные системы поддержки и принятия решений.

Создание интеллектуальных иерархических систем, переход от алгоритмов обработки данных к альтернативной технологии автоформализации профессиональных знаний, моделирование эволюции, построение гомеостатических, синергетических и эволюционных моделей

принятия решений позволит увеличить эффективность деятельности инженеров, конструкторов, технологов, менеджеров. Все это должно быть связано с новой концепцией развития естественных и искусственных систем, основанных на самоорганизации, построения порядка из хаоса, поддержания гомеостаза, интеллектуального, интегрированного моделирования.

В новых бурно развивающихся научных направлениях гомеостатики, синергетики и эволюционном моделировании исследуется совместное действие многих ИИС, в результате которого возникают новые знания и новые структуры. Философское определение ИИС, как известно, включает в себя понятие целостности, которое совмещает в себе свойства открытости и закрытости. Для снятия противоречий и выхода к синтезу в последнее время предлагается триада, обладающая системными свойствами и оказывающаяся простейшей структурной ячейкой ИИС. Комплексы из трех равноправных объектов, находящихся в заданных отношениях, существовали давно: «цель–план–стратегия»; «точность–локальность–простота»; «индукция–дедукция–абдукция»; «изменчивость–наследственность–отбор» и др. В триаде пара элементов находится в отношении дополнительности, а третий элемент задает отношение (меру) совместности. Общей для разных интеллектуальных объектов характеристикой является структура или архитектура ИИС. Это совокупность отношений, т. е. набор знаков или чисел, в который вкладывается определенный смысл. Она характеризуется многоуровневостью, единством и противоречивостью.

Новая ИИС создается путем эволюции. Тогда решение задачи соответствует построению определенной математической модели, обладающей нужными свойствами, которых не было у ее исходных прародителей. Смысл «существования» таких ИИС сводится только к порождению себе подобных потомков, которые при благоприятных обстоятельствах дают новое потомство до тех пор, пока возникшая популяция существует. Если задача не имеет решения, то популяция рано или поздно должна исчезнуть.

Основное отличие эволюции искусственной системы (ИС) от естественной системы (ЕС) состоит в наличии у ИС цели, связанной с решением определенной задачи. Здесь важна разработка критериев искусственного отбора, т. е. способов селекции и репродукции, при которых кроме бесперспективных удаляются и малоперспективные элементы.

Суть метода эволюции состоит в реализации целенаправленного процесса размножения — исчезновения, при котором размножению соответствует появление новых объектов, а гибели — удаление объектов из процесса в соответствии с определенным критерием естественного отбора (или селекции).

В «науке об искусственном» важными являются оптимизационные задачи принятия решений (ОЗ ПР). Для них необходимо каждый раз

доказывать сходимость процесса к искомому решению. Один эволюционный процесс отличается от другого видом объектов, способом размножения, числом объектов в популяции, числом поколений и критериями выживания. При математической интерпретации его основная идея состоит в следующем. Производится перебор по всей популяции, в результате чего возникают объекты двух поколений — родители и потомки. При этом метод эволюции превращается в алгоритм смены поколений, в котором потомок становится родителем только в следующей генерации. Проведение аналогий с ЕС представляется эффективным для решения важнейших ОЗ ПР.

ИИС имеют множество путей эволюции. Отсюда происходит разнообразие форм. Но реализуется только одна из них. Синергетика подтверждает, что в фундаменте ЕС и ИС заложен принцип ЯН–ИНЬ. В древнекитайской философии существование всего сущего связано с понятием Дао. Оно несет в себе две взаимодействующие противоположности ЯН и ИНЬ. Их взаимодействие является причиной изменения и взаимодействия вещей. ИНЬ — символизирует неопределенность и неоднозначность, случайные движения, а ЯН — завершенность, реализация цели и построение целого.

В процессах эволюции ИИС прошлое не исчезает. Надо научиться определять в эволюционных структурах информацию о ее прежних состояниях и процессах. Вся природа устроена так, что в ней действуют принципы экономии и ускорения эволюции. Природа выработала специальные механизмы воздействий. Надо правильно моделировать и распределять эти воздействия. Важна часто не величина управляющего воздействия, а его архитектура, пространственная конфигурация, топология, симметрия. При этом возможна самоорганизация объектов на различных иерархических уровнях. Эволюция в ИИС невозможна без смены одной устойчивой структуры другой, без конкуренции, без конфликтов, которые разрешаются в ее процессе путем борьбы и компромиссов, установления гармонии и гомеостаза. В этом случае трудоемкость ОЗ ПР резко возрастает и использовать алгоритмы полного перебора с экспоненциальной временной сложностью становится невозможным из-за необходимости обработки огромных массивов информации. Тогда становится необходимым модернизация структуры, как самих традиционных ИИС, так и основных блоков, стратегий, концепций, алгоритмов и методов ПР. Одним из подходов такой модернизации является использование методов моделирования эволюции, генетических алгоритмов, синергетических и гомеостатических принципов управления, построение порядка из хаоса, адаптации и взаимодействия с внешней средой. Такое развитие осуществляется под воздействием трех основных признаков: наследственности, изменчивости, отбора. Считается, что элементарной единицей эволюции являются популяции, и в ее основе лежат изменения наследственных структур, называемых мутациями. Причем только отбор превращает

мутационные сдвиги и изменения в адаптацию. Следовательно, отбор является одним из ведущих факторов адаптивной организации ЕС и ИС. Адаптация позволяет накапливать и использовать информацию в ИИС, достигать ее оптимального состояния при первоначальной неопределенности и изменяющихся внешних условиях.

В настоящее время эволюционное моделирование (ЭМ) — хорошо известная и эффективная оптимизационная методология, которую применяют для различных ОЗ ПР в науке об искусственном, основанная на аналогии процессов натуральной селекции и генетических преобразований искусственных интеллектуальных систем.

В быстро прогрессирующей теории ЭМ содержится теоретический анализ класса адаптивных, управляющих, интеллектуальных и иерархических систем, в которых структурные модификации осуществляются последовательными и параллельными преобразованиями ИИС.

Поиск оптимальных решений и выполняют генетические алгоритмы (ГА). В настоящее время ГА широко используются как эффективный поиск в таких задачах об искусственном как: разработка архитектур ИИС, оптимизация структур, решение нелинейных уравнений, создание ЭВМ новых поколений и др.

В последнее время началось исследование возможностей применения ГА для эффективного решения задач проектирования сложных искусственных систем. При этом постоянно возникает конфликт между сложностью систем и требованиями увеличения качества проектирования, уменьшения времени проектирования. Данные проблемы не могут быть полностью решены распараллеливанием процесса проектирования, увеличением персонала конструкторов и качеством рабочих станций. Одним из возможных подходов к решению этой проблемы является использование науки об искусственном. По мнению авторов, одна из таких технологий может базироваться на идеях моделирования эволюции, синергетики и гомеостатики.

Как известно, интеллектуальное поведение как искусственных, так и биологических систем определяется их структурой, архитектурой и системной организацией. Основные проблемы здесь определены Д. А. Поспеловым. Это — представление знаний, планирование, общение и организация поведения. Перечисленные проблемы основаны на создании эффективных формальных и нечетких алгоритмов.

Авторы предлагают разработку новых и модифицированных специальных «биоинспирированных» алгоритмов в различных областях науки, техники и принятия решений в неопределенных и нечетких условиях. Это связано с такой новой областью исследований, как мягкие вычисления, эволюционные стратегии, эволюционное моделирование, генетические алгоритмы и т. п.

Создание комплексов биоинспирированных алгоритмов позволит нам анализировать механизмы, лежащие в основе процессов познания

и синтезировать новое качество технических устройств, подойти вплотную к созданию теории искусственного интеллекта.

Приведем краткие исторические сведения из области биологии, генетики и эволюции.

В 1668 г. Реди высказал предположение: «*Omne vivum ex vivo!*» — «Все живое от живого!».

Впервые термин «эволюция» был использован в биологии швейцарским ученым Бонне в 1782 г. Слово «эволюция» произошло от латинского слова «развертывание» и является синонимом понятия развития. Под эволюцией понимаются медленные, постепенные, количественные и качественные изменения объекта. При этом каждое новое состояние объекта должно иметь по сравнению с предыдущим более высокий уровень развития и организации.

Известно, что эволюционное учение в наше время — это комплекс знаний об историческом развитии живой и неживой материи. В науке об искусственном под адаптацией понимают процесс накопления и использования информации в системе, направленной на достижение ее (системы) оптимального состояния при первоначальной неопределенности и изменяющихся внешних условиях.

Идеи применения знаний о живой природе для решения задач в ИС принадлежат еще Леонардо да Винчи, который спроектировал и пытался построить летательный аппарат с движущимися крыльями, как у птиц. Наблюдения в области адаптации живых организмов приводили, приводят и будут приводить к идеям наделить указанными свойствами искусственные системы.

В связи с развитием теории об искусственном данные идеи все более используются при моделировании мышления и поведения человека, создании современных компьютеров и т. д. В связи с этим возникают целые новые отрасли знаний и науки. Например, бионика (от греческого *bion* — элемент жизни) — наука пограничная между биологией, генетикой и техникой, решающая инженерно-технические задачи на основе генетики и анализа структуры жизнедеятельности организмов. Генетика — наука о законах наследственности и изменчивости организмов. Основные задачи генетики — это разработка методов управления наследственностью и наследственной изменчивостью для получения нужных индивидууму форм организмов или в целях управления их индивидуальным развитием.

Известно, что в 1866 г. Иоганн Грегор Мендель сделал величайшее открытие. Он описал общий закон природы и вывел рациональные формулы расщепления признаков в гибридном потомстве. Мендель пришел к выводу, что наследственность прерывиста (дискретна), что наследуется не большая совокупность свойств, а отдельные признаки. Он предположил, что в половых клетках есть какие-то материальные структуры (позже их назвали генами), ответственные за формирование признаков. Одна из основных заслуг Менделя — его гипотеза о мате-

риальных задатках, которые в двойном комплекте находятся в клетках и которые зародыш получает от обоих родителей.

Исключительную роль в явлениях наследственности играют хромосомы — нитевидные структуры, находящиеся в клеточном ядре. Каждый вид характеризуется вполне определенным числом хромосом, во всех случаях оно четное, и их можно распределить попарно. При делении половых клеток и в процессе оплодотворения каждая хромосома ищет себе подобную. Они сближаются и располагаются параллельно друг другу и почти сливаются. Затем они расходятся. Но во время контакта почти все хромосомы обмениваются своими частями. Сперматозоид проникает внутрь клетки. Его оболочка, шейка, хвост теряются, а ядро остается. Получается двухядерная клетка. Затем ядра сливаются и образуется нормальное ядро с нормальным двойным набором хромосом.

В клетках существует сложный и важный механизм перераспределения генетического материала. Каждая клетка организма имеет одинаковое число хромосом. Потомки имеют то же самое число хромосом, причем ровно половина хромосом от отца, а половина — от матери. При таком обмене передаются наследственные признаки. Вильсон в 1900 г. определил, что гены находятся в хромосомах. Две гомологичные хромосомы (одна от отца, а другая от матери) сближаются при созревании половых клеток и обмениваются частями. Это явление назвали кроссинговер. Оно происходит между разными генами случайным образом с разной частотой. Модель хромосомы в настоящее время — это нить, на которую, словно бусины, нанизаны гены.

В 1809 г. Ж. Ламарк говорил об эволюции, связанной с возникновением новых форм путем постепенного изменения старых и движения от простого к сложному. Ламарк считал, что организмы изменяются под прямым воздействием окружающей среды, что причиной эволюции являются «упражнения» органов и внутреннее стремление к прогрессу.

Ч. Дарвин — первый ученый, который определил в живой природе существование общего принципа — естественного отбора. В эволюционном учении нужно различать две стороны: учение о материале для эволюции и учение о ее факторах, ее движущей силе. Движущая сила эволюции — естественный отбор. В основе наследования лежат неделимые и несмешиваемые факторы — гены. Именно через отбор и происходит направленное влияние условий жизни на наследственную изменчивость. Сама по себе наследственная изменчивость случайна. Под воздействием окружающей среды отбираются признаки, которые лучше других соответствуют условиям жизни.

А. Клизовский, анализируя философские учения, писал, что «законы эволюции отбирают все ценное и пригодное для эволюции и отбрасывают в сторону, как мусор, как непригодное, все отсталое. Они не знают ни пощады, ни сострадания и проводят оценку каждого

лишь по степени пригодности или непригодности его для дальнейшего развития».

Наследственные изменения отдельных генов Г. де Фриз назвал мутациями. Мутации и служат элементарным материалом для эволюционного процесса. Они закономерно возникают в природных условиях. Понятия ген и генетика ввел датский ученый В. Иогансен.

Приведем факторы, которые меняют генетический состав природной популяции: мутационный процесс, изоляция, «волны жизни», отбор. Особое положение генов состоит в их уникальности. В хромосомном наборе каждый ген представлен только один раз. В 30-е годы было доказано, что генная мутация — это небольшое химическое изменение. Следовательно, ген имеет химическую природу, являясь молекулой или частью большой молекулы.

В 1953 г. с работ Уоткена и Крика началась новая наука — молекулярная генетика. Биохимические особенности живых организмов наследуются по законам, которые открыл Мендель. Все биохимические реакции в клетках управляются сложными белковыми веществами — ферментами. Существует следующая гипотеза: один ген — один фермент, т.е. функция гена состоит в образовании какого-либо одного фермента. В генах «записаны» планы строения белков — планы всех наследственных признаков.

В определении наследственности важную роль играет нуклеиновая кислота. Ядерную нуклеиновую кислоту называют дезоксирибонуклеиновой (ДНК). Цитоплазматическую нуклеиновую кислоту называют рибонуклеиновой кислотой (РНК). Само строение молекулы ДНК говорит о том, что она может обладать удивительным свойством самовоспроизведения. Строение белков закодировано в ДНК, находящейся в хромосомах, и записано в виде последовательности составляющих ее нуклеотидов. Эта информация передается с помощью РНК в цитоплазму: молекулы РНК выходят из ядра и присоединяются к мелким частицам (рибосомам), на которых и происходит сборка белка из аминокислот. Аминокислоты сначала активизируются, получая заряд энергии, необходимой для соединения друг с другом, а затем прикрепляются к молекулам транспортной РНК, которая ставит их на то место, где каждая из них должна быть. Генетический код оказался общим для всех естественных систем на нашей планете. Он практически расшифрован.

Каждый биологический вид имеет определенное постоянное количество хромосом. Многие организмы получают один набор хромосом от материнского, а другой, такой же, от отцовского организма. Поэтому у этих организмов в клетке каждая хромосома имеет гомологичного партнера, т.е. хромосомы в парах морфологически и генетически сходны. В процессах наследования признаков определяющую роль играет поведение хромосом при делении клеток.

Ген — реально существующая, независимая, комбинирующаяся и расщепляющаяся при скрещиваниях единица наследственности — самостоятельно наследующийся наследственный фактор. Совокупность генов составляет генотип. Фенотип — совокупность всех внешних и внутренних признаков.

Основные положения теории школы Т. Моргана по наследственности и изменчивости можно сформулировать следующим образом:

- Все признаки организмов находятся под контролем генов.
- Гены — элементарные единицы наследственной информации, они находятся в хромосомах.
- Гены могут изменяться — мутировать.
- Мутации отдельных генов приводят к изменению отдельных элементарных признаков, или фенов.

В настоящее время ген определяют как структурную единицу наследственной информации, далее неделимую в функциональном отношении. Его рассматривают как участок молекулы ДНК, кодирующий синтез одной макромолекулы или выполняющий какую-либо другую элементарную функцию. Комплекс генов, содержащихся в наборе хромосом одного организма, образует геном. Генетическая рекомбинация подразумевает несколько типов перераспределения наследственных факторов:

- рекомбинация хромосомных и нехромосомных генов;
- рекомбинация целых негомологичных хромосом;
- рекомбинация участков хромосом, представленных непрерывными молекулами ДНК.

Каждое решение некоторой рассматриваемой задачи об искусственных системах мы будем представлять как некоторую информацию, способную к обновлению посредством введения элементов иного решения. Хромосомы, представляющие собой отображения решений, должны быть гомологичны, так как являются взаимозаменяемыми альтернативами. Интерес представляет не замена одного сгенерированного решения на другое, что осуществимо простой оценкой исходных решений в соответствии с принятым критерием, а получение новых решений посредством обмена между ними информацией. Каждый участок хромосомы несет определенную функциональную нагрузку, и нас интересует создание такой комбинации этих участков, которая составляла бы наилучшее из решений при исходном генетическом материале. Поэтому целью рекомбинации будем считать накопление в конечном решении всех лучших функциональных признаков, какие имелись во всем наборе исходных решений. Основой регулярной (общей) рекомбинации является кроссинговер, т. е. обмен гомологичными участками в различных точках гомологичных хромосом, приводящий к появлению нового сочетания сцепленных генов.

Расщепление при независимом наследовании и при кроссинговере определяет изменчивость организмов вследствие комбинаторики су-

ществующих генов (аллелей). Аллелями называют определенное химическое состояние гена. В результате генных мутаций появляются химические изменения гена, которые через РНК могут реализовывать изменение функционирования молекулы. Мутации — это возникновение качественно новых генов (аллелей), хромосом и наборов хромосом. Сочетание обоих типов изменчивости вызывает общую изменчивость генотипа.

Генетический материал обладает такими универсальными свойствами, как дискретность, непрерывность, линейность и относительная стабильность, выявляемыми в ходе генетического анализа. Повышение разрешающей способности генетического анализа возможно с помощью изучения большего числа особей, применения селективных методов, ускорения мутационного процесса.

Все эти методы имеют важное значение в живой природе и могут найти применение в «науке об искусственном». Увеличение числа особей (решений) приводит к росту разнообразия генетического материала, что означает увеличение исходного набора контролируемых генами функций, а это, в свою очередь, позволяет провести более широкий отбор функций и тем самым улучшить конечное решение.

Применение селективных методов означает методический отбор генетического материала в соответствии с принятым критерием, имеющий целью повысить скорость получения конечного результата и его качество. Ускорение мутационного процесса ведет к получению все более разнообразного генетического материала.

В естественных и искусственных системах роль мутаций заключается в том, что именно они генерируют новые функции, затем происходит дубликация, закрепляющая обе функции, а после того начинается отдельная эволюция исходной и новой функции. Эта эволюция и показывает, что новая или возникшая в результате мутации функция обладает более высокими адаптационными качествами либо прежняя функция выполняет эту роль лучше.

Интересную идею приводит Клизовский: «Законы природы не есть приказания, отданные властью, но наличность условий, при которых неизменно совершается одно и то же явление. Если изменяется условие, то изменяется и явление. Природа не знает нарушения своих законов. Но природа побеждается послушанием ее закона».

В общем же эволюция стремится к усреднению (так как происходит все более однородное смешение разного по качеству с нашей точки зрения генетического материала). Поэтому в качестве одного из методов для получения наилучших результатов используется селекция. Селекция представляет собой форму искусственного отбора. Селекция, как наука, создана Ч. Дарвином, который выделял три формы отбора:

- естественный отбор, вызывающий изменения, связанные с приспособлением к новым условиям;

- бессознательный отбор, при котором «на племя» сохраняют лучшие экземпляры;
- методический отбор, при котором проводится целенаправленное изменение породы в сторону установленного идеала.

В учении об отборе Дарвин доказал, что главной движущей силой является отбор наилучших форм, требующий для успеха таких условий, как: правильный выбор исходного материала, правильная постановка цели, проведение селекции в достаточно широких масштабах и возможно более жесткая браковка материала, отбор по одному основному признаку. Схему селекции можно использовать при решении задач на основе искусственных систем.

Основой эволюционных процессов в органическом мире служит популяция. Популяция — это многочисленная совокупность особей определенного вида, в течение длительного времени (большого числа поколений) населяющих определенный участок географического пространства, внутри которого осуществляется та или иная степень случайного свободного скрещивания. Вид подразделяется на несколько популяций, каждая из которых эволюционирует самостоятельно. В популяции нет абсолютно тождественных особей. Каждая особь является носителем уникального генотипа, который управляет формированием фенотипа. Элементарным носителем генотипа в организме каждой особи является клетка. Но поскольку жизнь клетки намного меньше жизни особи, то фактическим носителем генотипа является длинная череда поколений клеток. Рождение новых поколений клеток обеспечивается биосинтезом клеток. В процессе биосинтеза генотип особи не меняется.

Существование каждой особи ограничено некоторым временным интервалом, по истечении которого особь погибает. При этом генотип особи исключается из генофонда популяции. Но при жизни особь может передать наследственную информацию (НИ). Известно 3 механизма передачи НИ при рождении потомства: бесполое размножение, половое размножение, промежуточная (между бесполом и половым) форма размножения.

В настоящее время установлено, что наследственные факторы — гены — являются специфическими молекулами ДНК или функционально обособленными участками таких молекул и что устойчивая передача генов от родителей к потомкам зависит в первую очередь от способности молекул ДНК к авторепродукции. Каждая особь в течение жизни подвергается воздействиям внешней среды. В некоторых случаях эти воздействия могут привести к перестройкам молекул ДНК, переносащих НИ. Изменение первоначальной последовательности генов в молекулах ДНК приводит к изменению свойств этой молекулы, а, следовательно, и наследственной информации.

Естественный отбор — единственный направляющий эволюцию элементарный фактор. Его действие всегда направляется складывающимися условиями существования. Рассмотренные выше факторы по

степени влияния на эволюцию можно упорядочить по убыванию влияния: естественный отбор, изоляция, колебание численности популяции, мутационные процессы.

Пусковой механизм эволюции функционирует в результате совместного действия эволюционных факторов в пределах популяции. В результате действия эволюционных сил в каждой популяции тысячекратно возникали элементарные эволюционные изменения. Со временем некоторые из них суммируются и ведут к возникновению новых приспособлений, что и лежит в основе видообразования.

Направленная молекулярная эволюция (НМЭ) подобна искусственному отбору. Если надо создать молекулу, обладающую каким-либо химическим свойством, следует выбирать из большой популяции молекул те, которые в наилучшей степени выражают это свойство, и произвести из них дочерние, в разной степени похожие на родителей. Этот процесс отбора и дупликации повторяется до тех пор, пока не будет достигнут нужный результат. Успех НМЭ определяется большим числом участников.

Согласно теории Дарвина эволюция осуществляется во взаимодействии трех повторяющихся вновь процессов: отбора, амплификации, мутации. Амплификация — процесс производства потомков или, более точно, копирование унаследованных членов, действует в природе совместно с отбором.

Впервые в лаборатории процесс эволюции был воспроизведен в 1960 г. Спигельманом из Иллинойского университета. Критерий отбора подобен библейскому: «Плодитесь и размножайтесь». Эволюция лишена предвидения; в любой момент времени члены в популяции отображают свойства, дающие преимущества предшествующим поколениям. Стратегия повторяющейся рандомизации может заставить молекулы эволюционизировать в направлении улучшения функциональных характеристик.

На основе приведенного исторического экскурса и краткого обзора генетики отметим, что полезными для решения различных задач в искусственных системах могут быть также генетические «операции», такие как кроссинговер, мутация, селекция и др. Роль кроссинговера — основная, она состоит в создании из имеющегося генетического материала желаемой комбинации функции в одном решении. Роль мутации состоит в том, чтобы вывести качественно не улучшающееся посредством кроссинговера решение на новый уровень (в том числе генерацией изначально отсутствующих функций). Роль селекции — в ускорении получения качественного решения.

В последнее время проявляется тенденция использования естественных аналогов при создании моделей, технологий, методик, алгоритмов для решения тех или иных задач искусственного интеллекта, стоящих перед человечеством. В большинстве случаев использование естественных аналогов дает положительные результаты. Как правило,

это объясняется тем, что аналог, взятый из природы, совершенствовался в течение многих лет эволюции и имеет на данный момент самую совершенную в своем роде структуру.

Рассмотрев модели построения порядка из хаоса, проанализировав основные принципы гомеостатики и эволюции, авторы предлагают триединый подход к решению интеллектуальных оптимизационных задач принятия решений. Он основан на иерархически взаимосвязанных триадах на метауровне: «синергетика + гомеостатика = эволюция».

В монографии проведен анализ построения гомеостатических, синергетических и эволюционных моделей принятия решений. При этом рассмотрены вопросы установления порядка из хаоса в моделях искусственных систем. Описаны эволюционные методы и генетические алгоритмы. Приведены новые архитектуры генетического поиска. Сделана постановка оптимизационных задач принятия решений. В архитектуру ИИС введен блок эволюционной адаптации, позволяющий управлять процессом принятия решений. Описаны новые перспективные технологии генетического поиска для решения оптимизационных задач, позволяющие частично решать проблемы предварительной сходимости алгоритмов. Разработаны принципы решения оптимизационных задач принятия решений на графах. Применение разработанных триединых концепций принятия решений позволило получать решения с локальными оптимумами за полиномиальное время.

Цель монографии — показать эффективность применения новых научных направлений гомеостатики, синергетики и биоинспирированных алгоритмов эволюционного моделирования для решения интеллектуальных оптимизационных задач на графах.

Творения природы совершеннее творений искусства.

*Цицерон*

Природа — единственная книга, все страницы которой полны глубокого содержания.

*И. Гёте*

## **1. ГОМЕОСТАТИЧЕСКИЕ, СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭВОЛЮЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

### **1.1. Анализ установления порядка и хаоса в моделях искусственных систем**

**1.1.1.** Проблемы искусственного интеллекта тесно связаны с организацией знаний об окружающем мире в виде математических структур, таких как множества, графы, гиперграфы, фреймы, алгоритмы, которые отражают реальные связи и отношения между любыми объектами в природе (в частности, в предметной области). К сожалению, пока не существует формального определения искусственного интеллекта. В науке и технике используются адекватные определения и описания искусственного интеллекта [1–6]. Например: ИИ — это новое научно-техническое направление, увеличивающее функциональные возможности технических систем и средств их проектирования; ИИ — системы, работающие со знаниями; ИИ — наука о концепциях в области информационной технологии; ИИ — средство решения интеллектуальных задач; ИИ — система, имитирующая некоторые стороны деятельности человека; ИИ — система, работающая с неформализованной и расплывчатой информацией. ИИ — это психическая способность к сознаваемому нестереотипному поиску, построению адекватных форм мышления и целесообразных способов поведения и действия, основанных на опыте и знаниях субъекта и имеющих тенденцию к опережению

событий [6]. ИИ — это синоним мышления, но в отличие от него определяющий качество этого процесса. Критериями качества считают эффективность, способность находить нестандартные решения, простоту в отношении когнитивной нагрузки. Моделирование различных взаимодействующих агентов становится основным предметом искусственного интеллекта [7].

В ИИ выделяют три направления: логическое, конструкторское и эволюционное; а также три аспекта: управление неопределенностью, обучение, адаптация в процессе эволюции.

Сейчас интенсивно развивается новая идеология исследований в области ИИ на основе системного подхода и многоагентно-ориентированной парадигмы. В работе [7] приведены основные принципы подхода к исследованию и моделированию искусственного интеллекта:

- исследования ИИ в иерархии взаимодействующих систем;
- исследования генезиса и эволюции интеллектуального поведения;
- исследования многомерности интеллекта;
- исследования самоорганизации и саморазвития искусственного интеллекта;
- исследования определения рекурсивных связей между ИИ и внешней средой;
- исследования приоритетов координаций;
- исследования выделения системных единиц искусственного интеллекта.

Разработка схем интеграции при системном подходе, анализе и синтезе к построению ИИ приводит к возникновению гибридного (синергетического) интеллекта. Основное здесь — единый, системный подход, который может быть выражен через следующие компоненты триады: «агент–многоагентная система–сообщество многоагентных систем».

Под интеллектуальным агентом в теории ИИ понимаются физические или виртуальные элементы, способные действовать на любые другие элементы; стремиться к некоторым целям, общаться с другими агентами, накапливать и использовать собственные ресурсы; воспринимать среду и ее части, строить частичное представление среды; адаптироваться, самоорганизовываться, саморегулироваться, саморазвиваться и самовоспроизводиться [7].

Тогда любая многоагентная система, подобно искусственной системе, состоит из множества агентов, множества задач, внешней среды; отношений между агентами; множества действий и операций над объектами.

С понятием ИИ тесно связано направление «искусственная жизнь» (ИЖ) [1–7]. Оно связано с исследованием интеллектуального поведения искусственной системы в рамках адаптации, выживания, самоорганизации, построения децентрализованных систем. В основе ИЖ лежат функциональный анализ и синтез, моделирование, эволюция и имитация живых систем.

Многоагентные системы (МАС) есть популяция простых и независимых агентов; каждый агент самостоятельно реализуется в локальной среде и взаимодействует с другими агентами: связи между агентами являются горизонтальными; глобальное поведение агентов определяется на основе расплывчатых правил.

Базовая МАС (БМАС) есть кортеж длины три:  $\langle \tilde{\Phi}, X, Y \rangle$ , где  $\tilde{\Phi}$  — график расплывчатого соответствия;  $X$  — область отправления (вход);  $Y$  — область прибытия (выход), причем  $X \times Y \subseteq M$ , где  $M$  — множество, задающее область определения расплывчатого соответствия. Набор таких БМАС может образовать иерархическую ИС, инвариантную к внешним воздействиям среды [7]. Тогда расплывчатую эволюционную МАС определим:  $\langle C, \tilde{\Psi}, I, K, S, E \rangle$ , где  $C = \{1, 2, \dots, n\}$  — множество агентов;  $\tilde{\Psi}$  — семейство расплывчатых соответствий ( $\tilde{\Psi} = \langle \tilde{\Phi}, X, Y \rangle$ );  $I$  — множество действий агентов;  $K$  — множество коммуникационных связей;  $S$  — множество расплывчатых состояний;  $E$  — множество эволюционных расплывчатых стратегий. На основе таких моделей можно анализировать процессы принятия решений с использованием ИС.

Уровень ИИИ характеризуется многосвязностью и мобильностью ассоциаций, проявляющихся в процессе поиска; быстротой анализа возникающих перспектив решений, адаптаций к внешней среде, способностью ориентироваться в неформально, неточно и некорректно сформулированном задании. Иногда говорят об интеллекте как феномене действительности, включающей в себя человека и технологии [6].

Кант и Гегель [8–9] считали, что интеллект ассоциируется с разработкой категорий разума и рассудка. При этом можно считать, что природа ИИИ двойственная, т.е. она одновременно логическая и биологическая. В этой связи ИИИ — это определенная форма равновесия, к которой тяготеют все структуры, образующиеся на базе восприятия, мышления и адаптации. Мышление — орудие высшей ориентировки человека в окружающем мире и в самом себе [8–11]. Условно можно считать, что ИИИ — это имя, обозначающее высшие формы организации или равновесие когнитивных структурирований. В работах [1, 2] ИИИ рассматривается как явление адаптации. Адаптация — то, что обеспечивает равновесие между воздействием организма на среду и обратным воздействием среды. Действие организма на среду называется ассимиляцией. Действие среды на организмы — аккомодация. Тогда адаптация — это равновесие между ассимиляцией и аккомодацией, т.е. равновесие во взаимодействии субъектов и объектов [12, 13].

Для повышения уровня «интеллекта» ИС и расширения ее возможностей, свободного формального и неформального взаимодействия с пользователем в нее закладываются знания, относящиеся к предметной области и внешней среде. Кроме того, ИС (ее математическое обеспечение) снабжается математическими моделями и методами для

построения выводов и механизмов обучения и самообучения, преобразования и практического использования введенных знаний. Укрупненная структура ИС по аналогии с другими интеллектуальными системами будет состоять из четырех подсистем: адаптивной, интерактивной, обрабатывающей и управления [14–16].

Первая подсистема состоит из нескольких иерархических уровней: микро- макро- и метауровней. На каждом из этих уровней происходит моделирование эволюции и адаптация алгоритмов к окружающей среде.

Такая трехуровневая адаптивная подсистема может быть представлена в следующем виде (рис. 1.1) [15].



Рис. 1.1. Пример трехуровневой адаптивной системы

Вторая подсистема анализирует входные описания на языке пользователя на основе имеющихся знаний и формирует внутреннее неполное и расплывчатое представление задачи.

Третья подсистема превращает неполное и расплывчатое описание задачи в полное и четкое и снова передает его интерактивной подсистеме. Далее процесс принятия решений (ПР) происходит итерационно до получения удовлетворительного решения.

Четвертая подсистема, используя координирующие блоки и обратные связи, управляет процессом решения, взаимодействуя с 1-й, 2-й и 3-й подсистемами.

Приведем одну из возможных концептуальных схем ИС (рис. 1.2) [1, 2, 15–17]. Здесь в качестве множества  $\{П_1, П_2, \dots, П_n\}$  выступает множество пользователей. Диалоговый процессор (ДП) является структурной единицей интеллектуального интерфейса ввода — вывода. Он обеспечивает заданный сценарий диалога в зависимости от степени

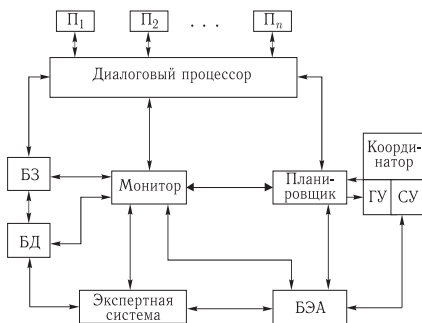


Рис. 1.2. Концептуальная схема ИС

подготовки пользователей и интеллектуальности ЭВМ. Диалоговый процессор выполняет одновременный ввод-вывод графических, цифровых, речевых и других образов. ДП реализуется программным, аппаратным или программно-аппаратным способом. Наилучшей формой использования ДП в ИС является совместная программная и аппаратная реализация на основе нейронных сетей и их модификаций. Диалоговый процессор содержит набор сценариев диалога, меню диалога, генераторы случайного и направленного поиска, блоки перебора.

Пользователь во взаимодействии с ДП на основе блочно-иерархического подхода и принципов декомпозиции производит разбиение заданной задачи большой размерности на совокупности функциональных подзадач меньшей размерности [15, 16]. Основная цель планировщика — поиск информации. Совместно с экспертной системой (ЭС) он осуществляет анализ преобразованных данных, полученных из ДП. В зависимости от значений внутренних, внешних и управляющих параметров, конструктивных ограничений, заданных режимов работы и т. п. выбирается несколько альтернативных путей решения. Каждому пути соответствует управляющий программный блок из монитора. Под управлением этого блока осуществляется выбор, редактирование, настройка и стыковка отдельных программных модулей, определяются типы и форматы всех данных, формируется рабочий комплекс программ. На рис. 1.2 БД — база данных; БЗ — база знаний; БЭА — блок эволюционной адаптации; ГУ — гомеостатическое управление; СУ — синергетическое управление. Подробнее об этих блоках будет сказано ниже.

**1.1.2.** Пospelов Д. И. [2, 14] определил 10 горячих точек в области ИИ, связанных с разработкой ИС:

- переход от вывода к аргументации;
- проблема оправдания;
- порождение объяснений;
- поиск релевантных знаний;
- понимание текстов;
- синтез текстов;
- когнитивная графика;
- многоагентные системы;
- сетевые модели;
- метазнания.

ИС могут быть описаны совокупностью знаков с отношениями между ними. Такие модели соответствуют ИС лишь частично, что делает отношение моделирования нечетким. Для формализации процесса используется семиотика — наука о знаковых системах. Прикладная семиотика (ПС) основана на семиотическом моделировании. Оно описывает динамику жизнедеятельности ИС при изменении ее знаний об окружающем мире и способах поведения в нем. ПС позволяет моделировать процессы, протекающие в открытых или динамических системах [16].

Понятийной основой ПС является треугольник Фреге, показанный на рис. 1.3. Множество  $X = \{X_1, X_2, X_3\}$  описывает представления человека или искусственной системы. Здесь, например,  $X_1$  — имя,  $X_2$  — понятие,  $X_3$  — представление. Сущности реального мира (внешней среды) — это объекты, явления, процессы. Их называют денотаты —  $X_4$ . Денотат ИС недоступен, а представляется через представления (модели) путем установления соответствия.



Рис. 1.3. Конструкция треугольника Фреге

Как видно из рис. 1.3, треугольник Фреге — это неориентированный граф  $G_\Phi = (X, U)$  с двумя подмножествами ребер,  $U = \{U_1 \cup U_2\}$ ,  $U_1 = \{1, 2, 3\}$ ,  $U_2 = \{4\}$ . Ребро 1 по имени объекта позволяет активизировать сведения об этом элементе. Ребро 2 позволяет найти информацию о свойствах рассматриваемого элемента. Ребро 3 устанавливает

соответствие имени элемента с его моделью. В общем виде на основе факторизации эту конструкцию можно представить в виде двух блоков  $X$ ,  $X_4$ . Информационная единица, структурой которого является множество  $X$ , называется в ПС знаком [16]. Вершина  $X_1 \in X$  определяет связи наследования. Отношения наследования обычно образуют иерархическую структуру в системе знаков. Очевидно, что между сетью знаков и сетью фреймов существует аналогия. Это позволяет определить операции на сетях из знаков — фреймов, выполнять операции вывода знаний и формирования новых знаний. Граф  $G_\Phi$  соответствует триаде: «синтаксис–семантика–прагматика». Синтаксис ( $X_1$ ) определяет кодирование знака; семантика ( $X_2$ ) — значение знака; прагматика ( $X_3$ ) — процедуры и действия. В ИС такая совокупность процедур обычно реализуется в планировщиках и определяет эффективность работы такой системы.

В схеме ИС (рис. 1.2) блоки ГУ [12, 18] и СУ [15, 19–24] совместно с БЗ и БЭА через планировщик осуществляют реализацию процедур поиска для нахождения множества решений и выбора некоторого подмножества эффективных решений среди имеющихся.

Одним из основных интеллектуальных компонентов ИС является БЗ [25–27]. Понятие «знания» является расплывчатым неформальным понятием. Сейчас под знаниями понимают нечеткие и четкие множества фактов и сведений, описывающих информацию относительно определенной предметной области, позволяющие решать определенный класс задач. Согласно [1, 2, 26–30], выделяют следующие типы знаний:

- физические, т. е. знания об окружающей среде и внутренних свойствах объектов;
- предметные, т. е. знания о данной предметной области;
- синтаксические, т. е. знания о правилах построения рассматриваемых структур;
- семантические, т. е. знания о конкретном смысле и значении элементов в структуре;
- декларативные, т. е. знания о фактах и данных;
- процедурные, т. е. знания об алгоритмах, методах, эвристиках;
- метазнания, т. е. обобщенные знания;
- «Инь и Ян», т. е. знания о преобразованиях и переменных на основе принципов комплементарности (противоположности);
- расплывчатые (синергетические), т. е. знания об интеллектуальном опыте природы.

Основные характеристики знаний — это интерпретируемость, концептуальность, структурированность, именованность, иерархичность, активность, рефлексивность, связность и степень согласованности [1, 14, 26].

При построении моделей ИС важным является логический вывод. Если имеется множество посылок  $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ , то из него выводим заключение  $\varphi$ . Логический вывод построен, если найдена цепочка формул,

заканчивающаяся той формулой, которую мы должны вывести, а каждый член этой цепочки есть либо аксиома, либо гипотеза, либо заключение, полученное по правилам дедуктивного вывода из предыдущих членов цепочки [7].

Рассуждение — это получение заключения из посылок с использованием некоторых эвристических правил наряду с дедуктивными, а также ряда управляющих условий. Тогда ИИ можно считать совокупностью способностей. Согласно [7], его принципиальные черты: выделение существенного в знании, способность к рассуждениям, рефлексия, выдвижение цели и выбор средств ее достижения, познавательная активность, адаптация к ситуации, формирование обобщений и обучения, синтез познавательных процедур.

**1.1.3.** В настоящее время в существующих искусственных системах в основном реализуются бинарные связи [2, 9, 30]. Бинарная парадигма согласно [30] превращает картину мира в совокупность парных отношений, утрачивая перспективу постижения целостности. Поэтому структура выбора «ИЛИ–ИЛИ» слишком упрощена. В этой связи для комплексного представления ИС будем использовать триединый (триадный) подход. Триадой считается совокупность из трех взаимосвязанных элементов. Различают три основных вида триад: линейные, переходные, системные. В линейных триадах все три элемента расположены на одной оси в семантическом пространстве. Переходные триады характеризуются формулой: «тезис–антитезис–синтез». В системных (целостных) триадах единство создается тремя элементами одного уровня, каждый из которых может служить мерой совмещения двух других, так что потенциально все три равноправны. Системные триады обладают универсальным семантическим свойством: природной способностью человека мыслить одновременно понятиями, образами, символами. Семантическая формула системной триады: «рациональность–интуитивность–эволюционность». Системная триада является простейшей структурной ячейкой синтеза. Третий элемент необходим для решения проблемы бинарных противоречий как мера их компромисса, как условие существования. Результат синтеза можно представить как вершину тетраэдра, в основании которого — системная триада [30].

Системные триады — основа формирования религий [8, 9]. Критерием целостности системной триады может служить принцип «неопределенность–дополнительность–совместимость». Здесь каждая пара элементов находится в соотношении дополнительности, а третий задает меру совместимости. Количественно эта закономерность видна на примере асимптотической математики. Она определяется триадой: «точность–локальность–простота». Совмещение точности и простоты достигается по мере локализации ИС.

Порождающий (креативный) взгляд на структуру ИС может быть также описан триадой: «способ действия + предмет действия = результат действия». В древних учениях Платона и Аристотеля это выражается триадой: «логос + хаос = космос» [10, 11]. Такая триада имеет принципиально временную причинно-следственную природу.

В общем случае известно большое число триад. Например: «закон природы + материальная субстанция = феноменальный мир»; «замыслы + потенция = произведение».

Использование и популярность триад связана с моделью содержательной, развивающейся, эволюционирующей ИС. Тогда вместо диад (есть ровно одна причина и одно следствие), будем рассматривать триады, т.е. допускать множественность причин и следствий событий. Минимальная возможность и есть полный граф на три вершины (креативная триада). На его основе можно неоднозначно моделировать эволюцию. Это дает возможность генерировать множество сценариев развития событий, неоднозначность будущего и возможного прошлого.

Например, в триаде «хаос + теос = космос»: хаос — это элементы проектирования или начало — ИНЬ (скрытые потенциальные возможности); теос — целевое начало, либо закон, либо способ действия, либо конец проектирования — ЯН; космос — результат взаимодействия или принцип гармонии, или результат действия. Выражение  $f(x) = y$ , например, также представляет собой триаду: « $f$  (функция) +  $x$  (аргумент) =  $y$  (значение функции)». Следовательно, триадный подход может служить некоторой основой простейших законов природы и позволяет создавать описание более сложных законов и структур [25].

Интеллектуальное поведение ИС можно также организовать на основе триады: «цель–план–стратегия». Для адекватного описания ИС и интеллектуальной деятельности опять требуется триединый механизм: «индукции–дедукции–абдукции».

Идея абдукции следующая. Даны группы фактов и выдвинуты некоторые гипотезы. Если эти гипотезы объясняют в некотором смысле эти факты, то они принимаются. Абдуктивный подход позволяет среди множества возможных гипотез выбирать именно те, которые необходимы в процессе анализа и синтеза ИС. Механизм рассуждений в ИИ есть не только и не столько простая имитация человеческих рассуждений, сколько одновременно их имитация и усиление.

ИС, кроме рассмотренных БЗ, БД и других блоков, включает: решатель задач и интеллектуальный интерфейс. Решатель — это рассуждатель плюс вычислитель. Рассуждатель реализует синтез познавательных процедур. В результате обучения ИС с помощью БД производим расширение БЗ. Синтез познавательных процедур состоит из трех этапов: индукция, система связанных аналогий (дедукция), абдукция.

ИС могут быть построены в виде конструкций, называемых квазиаксиоматическими теориями (КТ). КТ — это кортеж длины три  $K = \langle M_n, M_r, P_n \rangle$ , где  $M_n$  — множество принципов, частично форма-

лизирующих рассматриваемую предметную область;  $M_r$  — множество гипотез, которое пополняется во время работы;  $P_b$  — множество правил вывода;  $P_b = P_{b1} \cup P_{b2}$ ,  $P_{b1}$  — дедуктивные;  $P_{b2}$  — правдоподобные правила.

Для ПР с помощью КТ производится объединение следующих аксиом: процедурных, связи и структуры данных.

В ИС основная проблема — это обработка огромных массивов нечеткой информации. Поэтому структурированность и иерархичность, т. е. упорядоченность информации, упрощает эту задачу.

Науку, изучающую взаимодействие подсистем внутри системы, в результате которой в процессе самоорганизации возникают новые упорядоченные структуры в макроскопических масштабах, называют синергетикой [19, 20, 22–24, 28–30].

Введение общего понятия подчинения как одного из основных принципов самоорганизации принадлежит Г. Хакену [20]. Используя это понятие, в сложных системах можно исключить большое число переменных и свести задачу к меньшей размерности. Дифференциация клеток в биологии и процесс эволюции могут служить примерами самоорганизации. Общие принципы, управляющие возникновением самоорганизующихся структур и/или функций, — это основной вопрос синергетики [29].

ЕС дают большое число примеров упорядоченных и организованных структур. В биологических системах ничего не происходит без коопераций ее частей на высоком уровне. Синергетические процессы позволяют биологическим системам трансформировать энергию, предварительно преобразованную на молекулярном уровне, в ее макроформы. В этой связи можно считать, что эволюция — это синергетический процесс образования все новых и новых макроструктур (т. е. новых видов). Модели эволюции биомолекул основаны на математической формулировке принципа Ч. Дарвина, т. е. выживании более приспособленного вида. Биомолекулы, как считают, размножаются автокаталитически. Такой механизм обуславливает отбор, приводящий в сочетании с мутациями к эволюционному процессу [15, 20, 24].

Во всех случаях в природе и ИС имеется иерархия, т. е. система состоит из очень большого числа подчиненных подсистем. Отметим, что многоуровневое управление в иерархических ИС предпочтительнее централизованного подхода, так как диспетчирование может осуществляться быстрее и с меньшим требованием к объему памяти; система менее чувствительна к изменениям структуры взаимодействия — изменениям, которые могут иметь регулярный или случайный характер.

Приведем двухуровневое представление ИИС (рис. 1.4). Здесь  $m_1, m_n, m_{n+1}$  — входы;  $y_{i,f}$  — предварительный выход;  $G$  — глобальная функция качества;  $V$  — окончательный выход. Координатор может учитывать независимость подпроцессов друг от друга и согласовывать

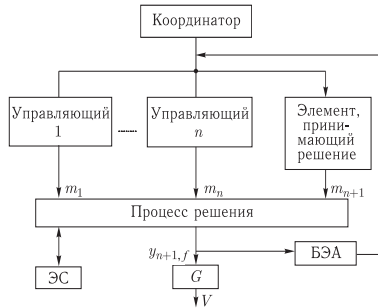


Рис. 1.4. Двухуровневое представление ИИС

взаимодействия для их управления. Важные проблемы в ИИС — осуществление перехода с уровня на уровень, и определение того, как поведение системы на одном уровне влияет на системы, расположенные на соседних уровнях.

Каждый элемент имеет собственную цель, которая зависит от параметра, получаемого от координатора. Координатор может иметь цель, отличную от глобальной цели, и выбирать параметр так, чтобы обеспечить выполнение своей собственной цели. Если зависимость между целями закономерна, система может достигнуть глобальной цели. Интегральное поведение определяется действиями координатора и его стремлением добиться выполнения собственной цели. Таким образом, интеграция в искусственных системах достигается посредством координации [18].

Приведем основные характеристики ИИС:

- последовательное вертикальное расположение подсистем, составляющих данную ИИС (вертикальная декомпозиция);
- приоритет действий или право вмешательства подсистем верхнего уровня в работу нижних уровней;
- зависимость действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих функций.

Взаимодействие между уровнями в ИИС может проходить как между двумя близлежащими уровнями, так и между любым числом уровней. Входы и выходы могут быть распределены по всем уровням. Качество работы всей ИИС обеспечивается обратной связью.

ИИС обычно классифицируют по уровням: описания или абстрагирования, сложности ПР, организации выполнения управления для решения задач. ИИС задается семейством моделей, каждая из кото-

рых описывает поведение системы с точки зрения различных уровней абстрагирования. Для каждого уровня существует ряд характерных особенностей и законов, которые и описывают поведение ИИС. Для лучшего функционирования необходима как можно большая независимость моделей для различных уровней.

Фундаментальную роль в ИИС играют стратифицированные или многоуровневые модели. Тогда, в зависимости от задачи, сначала можно ограничиться одним уровнем, а затем либо детализировать свои знания, двигаясь вверх, либо углубить, двигаясь вниз.

В любой ИИС принятия решений существуют 2 особенности:

- Когда приходит время принимать решения, принятие и выполнение решения нельзя откладывать.
- Неясность относительно последствий различных альтернативных действий и отсутствие достаточных знаний о имеющихся связях препятствуют достаточно полному формализованному описанию ситуации, необходимому для рационального выбора действий.

Эти два фактора приводят к основной дилемме ПР: с одной стороны, необходимо действовать немедленно; с другой, прежде чем приступить к действию, необходимо проанализировать и понять ситуацию. Разрешению дилеммы помогает ИИС. Каждый блок здесь — принимающий решение элемент. Так, например, сложная проблема ПР по управлению разбивается на семейство последовательно расположенных простых подпроблем, что позволяет упростить решение проблемы.

Цель надо выбирать так, чтобы ее можно было развернуть в подцели и тогда появляется возможность оценить, приблизились ли мы к первоначальной цели.

**1.1.4.** Рассмотрим функциональную иерархию ПР или управления в условиях полной неопределенности [15, 16, 18]. Здесь необходимо:

- Выбрать стратегию для ПР.
- Уменьшить или устранить неопределенности.
- Осуществить поиск предпочтительного или допустимого способа действий, удовлетворяющего заданным ограничениям.

Простую функциональную ИИС можно составить из трех слоев: слой выбора, слой обучения или адаптации, слой самоорганизации.

Задача слоя выбора — конкретизация множества неопределенностей. Основная цель слоя адаптации — обучение, т.е. определение возможностей сужения множества неопределенностей и упрощения работы слоя выбора.

Слой самоорганизации должен выбирать структуру, функции и стратегии для низлежащих слоев, чтобы по возможности приблизиться к глобальной цели. Если общая цель не достигается, этот слой может изменить критерии на первом слое или стратегию обучения на втором в случае неудовлетворенности оценки. Всегда необходимо учитывать меняющиеся технологические условия и ограничения, нала-

гаемые оборудованием и внешней средой. Задача управления в ИИС, осуществляющего регулирования, — удерживать (в условиях неизбежных отклонений) соответствующие переменные около заранее заданных значений [18].

Приведем один из возможных примеров многоуровневой организационной иерархии в ИИС [15]:

- ИИС состоит из семейства взаимодействующих подсистем.
- Некоторые из подсистем являются элементами, принимающими решения.
- В системе принятия решений элементы располагаются иерархически.

При PR элементам нижних уровней должна быть предоставлена некоторая свобода в выборе их собственных решений. Они в частном случае могут быть такими, которые выбрало бы ЛПР на верхнем уровне. Элемент верхнего уровня имеет дело с более крупными подсистемами или с более широкими аспектами поведения ИИС. Период PR для элемента верхнего уровня больше, чем для элементов нижних уровней. Элемент верхнего уровня имеет дело с более медленными аспектами поведения ИИС.

У каждого слоя ИИС имеется свой набор методов решения [12, 15, 18, 20, 22]:

- Выбор — управление с обратной связью.
- Адаптация — статистические методы и методы распознавания образов.
- Самоорганизация — эвристические, синергетические, гомеостатические методы поиска.

Проблема, решаемая элементом нижестоящего уровня, зависит от вышестоящего элемента (ВЭ) и заключается в выработке значений определенного параметра. Обычно вводится приоритет действий ВЭ путем вмешательства до PR. Это основной способ координации. Вмешательство до PR основано на прогнозировании поведения как самой ИИС, так и окружающей среды. ВЭ в ходе такого процесса определяет функции качества для оценки деятельности нижестоящего элемента (НЭ). Он должен исправить посланные ранее элементами нижестоящего уровня инструкции, если допущения, выработанные на основе этих инструкций, неверные. Эти действия координирующего элемента после PR есть корректирующее или поощряющее вмешательство.

Запишем основные способы координации:

- **Координирование путем прогнозирования взаимодействий.**

Здесь ВЭ посылают нижестоящим значения будущих связующих сигналов. НЭ начинают вырабатывать свои локальные решения в предположении, что связующие сигналы будут такими, какими их предсказал связующий элемент.

- **Координация путем оценки взаимодействия.**

ВЭ задает диапазон значений для связующих сигналов. НЭ рассматривают эти сигналы как возмущения, принимающие любое значение в заданном диапазоне.

- **Координирование путем «развязывания» взаимодействий.**

В этом случае элементы нижестоящего уровня трактуют связующий сигнал как дополнительную переменную решения.

- **Координирование типа «наделение ответственностью».**

ВЭ снабжает НЭ моделью зависимости между его действиями и откликом системы.

- **Координирование путем «создание коалиций».**

НЭ знают о существовании других элементов, также принимающих свои решения на том же уровне. ВЭ определяет, какого уровня связи разрешены между ними. Это приводит к коалиционным или конкурентным отношениям между НЭ.

Координация имеет 2 аспекта: самоорганизации (изменения структуры) и управления (выбор координирующего вмешательства при фиксированной структуре). Самоорганизация может относиться к изменениям функций и взаимосвязей, используемых в процессе координации. Работа ВЭ сводится к модифицированию функций, выбору способа координации, координирующих воздействий, определяющих стратегии НЭ.

Выбор модели для ВЭ основывается на признании того факта, что для ВЭ управляемый процесс описывается как взаимодействие семейства взаимосвязанных подсистем, каждая из которых преследует собственные цели. Иерархическое упорядочивание часто связано с процессом изменения структуры уже существующей ИИС для повышения эффективности ее работы.

Опишем функциональную ИИС так:  $S: X \rightarrow Y$ . Это — отображение абстрактного множества  $X$  в  $Y$ , что можно записать так:  $S \subseteq X \times Y$ , пара  $(x, y) \in S$ , когда  $y$  является решением определенной задачи, конкретизация которой осуществляется посредством задания  $x$ . Тогда  $S$  — это модель ИИС принятия решений. Пусть  $g: X \rightarrow V$  функция, отображающая произвольное множество  $X$  в множество  $V$ , частично или полностью упорядоченное отношением «меньше» или «равно». При изменении определенных условий (управляющих параметров) в системах образуются качественно новые структуры в макроскопических масштабах. ИИС обладает способностью переходить из одного нечеткого состояния покоя в неоднородное, но хорошо упорядоченное состояние или даже в одно из нескольких упорядоченных состояний. Система может совершать случайные движения, что считается хаосом [19, 20, 30]. Такие процессы самоорганизации в макромасштабах могут приводить к возникновению качественно новых ИИС.

**1.1.5.** Во всех ИИС, представляющих интерес для синергетики, решающую роль играет динамика. Это как бы обобщенный дарвинизм, действие которого распространяется на органический и неорганический мир. По Г.Хакену [21], возникновение макроструктур обусловлено рождением коллективных «мод» под действием флуктуаций, их конкуренций и выбора наиболее приспособленной моды. Решающую роль играет параметр  $t$  — время [21]. Следовательно, синергетика исследует эволюцию систем во времени. Временные, пространственные и пространственно-временные структуры возникают, а не накладываются на систему извне. Процессы, приводящие к возникновению таких структур, Г.Хакен [20, 21] называет самоорганизацией. В ходе эволюции систем может происходить целая иерархия процессов самоорганизации. Глобальное воздействие на систему окружающей среды может вызвать увеличение числа компонент ИИС, изменение управляющих параметров и самоорганизацию. При медленном изменении системы под воздействием окружающей среды она в критических точках может переходить в новые состояния, отличающиеся более высоким порядком или структурой.

Структуры могут возникать в результате самоорганизации, когда ИИС из некоторого начального (неупорядоченного или однородного) состояния переходит в другое конечное состояние. Например [21], для вектора состояния

$$q(x, t) = u(t)v(x), \quad (1.1)$$

где  $v(x)$  описывает некоторый пространственный порядок,  $u' = \lambda u$  — уравнение для параметра порядка [20]. При быстром изменении управляющего параметра  $\lambda$ , когда неравенство  $\lambda < 0$  быстро переходит в неравенство  $\lambda > 0$ , появляется переходный вектор состояния вида

$$q(x, t) = e^{\lambda t}v(x). \quad (1.2)$$

Этот вектор, согласно Г.Хакену, описывает некоторую структуру. Для того чтобы могло возникнуть это решение, в системе должны существовать флуктуации. В противном случае решение  $u \equiv 0$  и, следовательно,  $q \equiv 0$  остается неизменным навсегда [21].

Синергетика рассматривает нестационарные состояния, динамику, взаимопереходы, разрушения и созидания ИИС. Согласно [23, 24, 29, 30], образ мира (в синергетическом описании) следующий: мир открыт и сложноорганизован, он не «ставший, а становящийся», непрерывно возникающий и изменяющийся, он эволюционирует по нелинейным законам, т.е. полон неожиданных поворотов, связанных с выбором дальнейшего развития. Каждый период в истории приводит к своей модели природы. Синергетика — это попытка рационально объяснить нерационально устроенный мир или попытка создать рациональную модель нерационально устроенного мира [29, 30]. Существует еще ряд определений. Синергетика — наука об универсальных законах эволю-

ции в природе и обществе. Синергетика — наука о самоорганизации физических, биологических и социальных систем; наука о коллективном, когерентном поведении систем различной природы [23]. Примером синергетических систем в биологии считается образование высокоупорядоченных структур при морфогенезе, а также динамика популяций. Известно, что в таких системах могут возникать как упорядоченные, так и хаотические колебания [21, 30].

В природе (естественных системах (ЕС)), как правило, должны соблюдаться единые законы эволюции. Общий эволюционный процесс как процесс самоорганизации, несмотря на стихийность, обладает направленностью, так как идет рост разнообразия форм и сложности структур. Человек изучает мир не извне, а изнутри, т. е. его представления о мире являются представлениями части о структуре целого [29].

ИС, по определению П. Анохина, — комплекс избирательно вовлеченных компонентов, у которых взаимное действие и взаимоотношения принимают характер взаимодействия компонентов на получение фиксированного результата [6].

Известны [22, 29] два основных фундаментальных свойства ИС:

- обмен с окружающей средой энергией, веществом и информацией;
- взаимодействие, т. е. когерентность поведения между компонентами.

Согласно Больцману [23, 24], природа стремится к переходу от состояний менее вероятных к состояниям более вероятным. Концепция хаос–порядок связана с понятием энтропии. Известно [30], что в замкнутых системах энтропия может служить мерой относительной степени хаотичности. Существует теорема Больцмана о возрастании энтропии в процессе эволюции к равновесному состоянию. Она позволяет показать, что равновесное состояние соответствует не только максимуму энтропии, но и является устойчивым. В этой связи энтропия обладает совокупностью свойств, позволяющих использовать их в качестве меры неопределенности при статическом описании процессов в макроскопических системах.

Энтропия была первоначально введена в термодинамике как функция состояния, изменение которой определяет количество переданного системе тепла:

$$dQ = TdS, \quad (1.3)$$

где  $S$  — энтропия,  $Q$  — теплота,  $T$  — температура.

Равенство (1.3) выражает второй закон термодинамики для квазистатических процессов. При обратимом адиабатическом процессе, когда  $dQ = 0$ , энтропия неизменна. При необратимом адиабатическом процессе энтропия возрастает и при достижении равновесного состояния остается неизменной.

Знаменитая Н-теорема Больцмана выражается следующим образом: *при временной эволюции замкнутой системы к равновесному состо-*

янию энтропия возрастает и остается неизменной при достижении равновесного состояния [23, 30].

Теорема Гиббса утверждает, что при определенных условиях равновесное состояние отвечает максимуму энтропии и является наиболее хаотическим. Другими словами, согласно Гиббсу при одинаковости нормировки и средней энергии энтропия равновесного состояния максимальна [23, 24].

Шеннон определил энтропию как меру неопределенности дискретных сообщений с вероятностью  $f_n$  дискретной переменной  $n$  [31].

Климонтович [23] предлагает говорить об энтропии Больцмана–Гиббса–Шеннона и использовать энтропию в качестве меры неопределенности при статическом описании процессов в произвольных открытых системах.

Информация по Шеннону определяется разностью безусловной и условной энтропий и связана с соответствующим изменением степени неопределенности в состоянии выделенной системы.

Известно, что энтропия системы равна логарифму доступного ей объема фазового пространства, мерой которого является число  $N$  возможных микросостояний системы:

$$S = k \ln N, \quad (1.4)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана.

Тогда хаос, т. е. беспорядок, вносимый в макросистему, пропорционален относительному увеличению числа ее микросостояний, т. е.

$$dS = k \frac{dN}{N}. \quad (1.5)$$

Следовательно, если в системе под действием управления число  $N$  ее возможных состояний уменьшается, т. е. сжимается ее фазовый объем, то в системе увеличивается порядок. Когда в системе возможно лишь одно состояние ( $N = 1$ ), ее энтропия равна нулю.

В равновесии ИИС будет находиться в состоянии максимально возможной неоднородности. В ИИС допустимы отклонения от наиболее вероятного значения, которые называются флуктуациями [20]. Они тем менее вероятны, чем больше число элементов в ИИС. Следовательно, вероятность отклонения от наиболее ожидаемого состояния в ИИС убывает с ростом числа элементов. В эволюции системы каждая популяция обладает наследственной изменчивостью, т. е. происходят случайные отклонения от наиболее вероятного среднего значения. Обычно, когда отклонение мало, оно следует нормальному закону распределения случайных величин. Но наследственная изменчивость не затухает, как всякая флуктуация. Наследственные признаки закрепляются, если они имеют приспособительный характер, т. е. обеспечивают виду лучшие условия существования и размножения.

ЕС эволюционирует в направлении роста энтропии  $S = S_{\max}$ , если она изолирована, т.е. она направлена в сторону равновесия в изолированной системе. ИС не несет памяти о своем эволюционном развитии, ЕС несет память об этом. В ЕС наследственность не затухает, а наследует и закрепляет те признаки, которые позволяют ей выжить. По Ч. Дарвину в мире происходит непрерывное рождение все более сложно организованных живых форм, структур и систем [30, 31]. Из всего многообразия выделяют две основных концепции эволюции:

- В ИС развитие идет однонаправленно, в сторону роста энтропии, т.е. к выравниванию форм.
- В ЕС развитие приводит к увеличению порядка, т.е. к уменьшению энтропии.

Общее изменение энтропии:

$$\Delta S = \Delta_i S + \Delta_e S, \quad (1.6)$$

где  $\Delta_i S$  — внутренние изменения энтропии, а  $\Delta_e S$  — приток или отток энтропии.

В открытой системе возможно состояние, когда энтропия уменьшается, т.е. появляется принципиальная возможность самопроизвольного движения от хаоса к порядку. При большом оттоке энтропии в окружающую среду общая энтропия системы уменьшается. В этом случае уменьшается хаос в системе, т.е. в ней начинает возникать структурообразование [23, 32].

Рост упорядоченности ЕС, т.е. процесс структурообразования, соответствует онтогенезу, а многообразие возникающих при этом форм описывается морфогенезом [24]. В ходе развития неравновесных процессов в ЕС при некотором критическом значении внешнего потока энергии или вещества из неупорядоченных состояний из-за потери устойчивости могут возникать упорядоченности. Они называются диссипативными структурами — это и есть самоорганизация [29]. Неустойчивость означает, что флуктуации (возмущения) могут перестать быть просто шумом и превратиться в фактор, направленно действующий на глобальную эволюцию системы. Во всех процессах, происходящих во Вселенной, присутствуют случайные (стохастические) факторы. Они влияют на развитие процессов и придают им некоторую неопределенность. Эти процессы объясняются основными принципами синергетики [20, 21, 23, 24, 29, 30]:

- Предметом ЕС и ИС является не только общее, но и случайное.
- Естественный порядок не является постоянным.
- Для описания ЕС и ИС важны неформальные, нечеткие методы.
- Детерминизм в описании ЕС и ИС не исключает случайность.
- Развитие ЕС и ИС — многовариантное и альтернативное.

- Развитие ЕС и ИС проходит через неустойчивость — хаос не только разрушителен, но и конструктивен.
- Процесс развития ЕС и ИС сочетает в себе дивергентные (рост разнообразия) и конвергентные тенденции (свертывание разнообразия).
- Развитие ЕС и ИС происходит по нелинейным законам.

**1.1.6.** Синергетика приближает нас к целостному образу мира, состоящего из хаоса и порядка, необходимости и случайности, динамизма и гомеостаза, организации и дезорганизации, гармонии и дисгармонии. Эта наука переносит акцент с проблем эволюции на проблемы организации и упорядочивания. Существуют параллели между положениями теории самоорганизации и идеями древних восточных учений [8–11, 29, 31–36]. Синергетика приводит к тем же выводам, что и учения древности: понять природу и себя — значит, овладеть логикой высоких смыслов организации природы и себя в этой природе [29]. Она устанавливает связь между прошлым, настоящим и будущим интеллектуального и духовного опыта человека и позволяет говорить о диалоге человека и природы, определяет связь между историей человека и изменяющейся природой. Эти связи, новый синтез, поиск единства между природой и человеком при построении ИС — одна из фундаментальных тенденций во Вселенной [29, 30].

Путь к воссозданию равновесия связан с определением взаимосвязи современного естествознания и восточных учений [28, 29, 32–36]. Согласно древней индийской и китайской философии мир (природа) — не атомарная совокупность предметов, а единая нерасчлененная, вовлеченная в бесконечное движение реальность, идеальная и материальная [29, 33–35]. Древняя китайская классическая «Книга перемен» утверждает [34]: «Перемены и преобразования представляют собой первичный аспект природы; структуры и симметрии, порожденные ими, нечто вторичное; человек следует законам Земли; Земля следует законам Неба; Небо следует законам Дао; Дао следует самому себе (законам своей внутренней природы)».

Все вещи и явления должны быть составными частями иерархии целостностей, лежащих в основе космического порядка, и следовать внутренним побуждениям своей собственной природы. Необходимо решить проблему перехода от естественных принципов к количественным формализованным соотношениям. Для этого важно использовать законы, справедливые для всех форм существования материи и являющиеся инвариантными.

Смысл синергетики состоит в том, что в открытых системах, обменивающихся с внешней средой энергией, веществом, информацией, возникают процессы самоорганизации, т. е. процессы рождения из хаоса некоторых устойчивых упорядоченных структур с новыми свойствами [20, 30]. Синергетика помогает формированию нового синтеза

технических наук, философии и истории на основе интуиции, образного восприятия, спонтанности мышления, нелинейности, поливероятности, неравновесности и бифуркационности. Она позволяет соединять два взаимодополнительных способа постижения мира через образы и через число. Такая наука содержит модель саморазвития человека в самоорганизующемся мире, причем миропорядок в ней многослойный, иерархический и целостный [21, 23, 28–30].

Существуют два фундаментальных свойства синергетических систем [20–23, 28, 29]: обмен с внешней средой, взаимодействие компонентов системы.

Возникновение новой структуры может проходить по разным траекториям. Приведем стандартную универсальную схему эволюционного процесса для ИС. На начальном этапе развития происходит медленное изменение свойств ИС. Этот этап предсказуем до случайных флуктуаций. В какой-то момент времени ранее стабильное состояние теряет устойчивость и возникает возможность разных путей развития. Это и есть точка бифуркации. Среди различных ветвей эволюции есть траектория (коридор), которая отличается относительной устойчивостью и как бы притягивает к себе множество траекторий систем с разными состояниями. Эта траектория называется аттрактор. Если система попадает в этот коридор, то она неизбежно эволюционирует к этому относительно устойчивому состоянию [29].

Существуют устойчивые образцы (схемы), в соответствии с которыми происходят все изменения в многообразном мире. Приемы переноса знаний используют аналогии и прототипы как логические алгоритмы описания законов самоорганизации. Единство мира и изоморфизм — важная характеристика при построении ИС. Синергетика объясняет единство мира и структурного единообразия различных его форм. В процессе создания ИС важная проблема — поиск изоморфизма (подобия), который есть следствие общих свойств систем разной природы.

Синергетика определяет три этапа синтеза создания ИС [19, 20, 28, 29]:

- Структурный — определяются процессы и концепции построения упорядоченных ИС из хаоса.
- Модельный — создание целостной модели ИС.
- Иерархический — выработка представлений об ИС как о составляющей процесса самоорганизации.

Теория самоорганизации объединяет в себе бифуркацию, флуктуацию, гомеостаз, энтропию, равновесие, неравновесие и эволюцию [21, 28].

Ключевыми понятиями теории самоорганизации ЕС и ИС (составляющими ее суть) являются хаос и порядок. Понятие «порядок» связывают с математическим отношением элементов множеств, графов и гиперграфов. Порядок содержит в себе хаос. Хаос, как предпола-