

ЭВОЛЮЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

© 2000 В.А. Виттих

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Применительно к открытым сложным системам вводится понятие эволюционного управления и раскрывается его содержание. Обосновывается необходимость создания теории эволюционного управления на основе холистического (целостного) подхода. Предлагается структура этой теории, включающая онтологию процессов управления, ситуационный эмпирический базис, систему ограничений, исчисление и метазнание, предназначенное для обеспечения пользователей информацией по управлению решением задач. Показывается необходимость объединения перечисленных эпистемологических составляющих в единую развивающуюся систему знаний в рамках специальным образом организованной компьютерной среды. Подчеркивается значимость проблемы интеграции знаний, предполагающей их постоянное приобретение, верификацию, накопление в компьютерной среде и обеспечение доступа к ним со стороны пользователей. Утверждается, что исчисление теории эволюционного управления сложными системами должно базироваться как на формальных процедурах, реализуемых с применением компьютеров, так и на неформальных умозаключениях лиц, принимающих решения. С целью моделирования процессов коллективного выбора обосновывается целесообразность использования мультиагентных систем, реализуемых в виде сети взаимосвязанных модульных программных систем, базирующихся на знаниях.

Введение

В последние годы уходящего столетия во всем мире проявился огромный интерес к реформированию управления в сложных социально-экономических системах, таких как промышленные и сельскохозяйственные предприятия, регионы и муниципальные образования, межрегиональные объединения и государства в целом. Интерес этот не случаен, поскольку принципы “идеальной бюрократии”, наиболее часто используемые в подобных системах, в современном динамичном мире не обеспечивают должной гибкости и, соответственно, эффективности управления. Жесткие бюрократические структуры стали тормозом на пути социального и технического прогресса.

Начавшиеся реформы направлены на придание существующим иерархическим системам управления большей гибкости прежде всего путем децентрализации управления. Однако реализация таких преобразований является чрезвычайно сложной проблемой, поскольку речь идет не о “косметическом ремонте” системы управления, а о кардинальном изменении самого подхода к управлению: административно-командные системы управления с их априори заданными структу-

рами, делающими принудительной совместную деятельность людей, должны быть заменены новыми самоорганизующимися системами, в которых, наоборот, структура приспосабливается к деятельности и обеспечивается естественная эволюция сложных систем. Поэтому такое управление может быть названо эволюционным. В первой части статьи раскрывается существо понятия “эволюционное управление”.

Во второй части статьи рассматривается структура теории эволюционного управления, которая отличается от структур, традиционно используемых в классических теориях. Дело в том, что любая естественнонаучная теория включает в себя идеализированный объект, ядро (совокупность понятий и отношений между ними), исчисление (множество правил вывода и способов доказательств) и совокупность следствий, логически выведенных из основоположений теории [1]. Идеализированный объект обозначает мысленную конструкцию, которая создается посредством идеализации и связана с введением в содержание образуемого понятия признаков, в принципе не могущих принадлежать его денотату, т.е. множеству предметов, обозначаемых данным понятием [2] (напри-

мер, отсутствие размеров у такого идеализированного объекта как “материальная точка” или отсутствие трения при движении по “абсолютно гладкой поверхности”). К числу наиболее распространенных относится также идеализация изолированной, или замкнутой, системы.

Теория управления, построенная на основаниях механики, использует весь арсенал ее идеализированных объектов: и “материальную точку”, и “замкнутую систему”, и многие другие идеализации, отсутствующие в реальном мире. Тем не менее, теория, опирающаяся на подобные представления, применительно к управлению сложными техническими объектами иногда дает результаты, которые вполне устраивают практику инженерной деятельности. Однако, когда *речь идет об управлении сложными социально-экономическими или организационными системами, включающими в себя людей, принимающих решения*, использование классической теории управления с ее упрощениями не представляется возможным, поскольку подобные открытые системы, обладающие способностью к самоорганизации и эволюции, должны изучаться с помощью куда более сложных теоретических конструкций [3]. Ошибочно надеяться, что сложные системы, с которыми мы сталкиваемся в реальном мире, имеют простые отображения в абстрактном мире, то есть в мире знаний. Поэтому и возникает вопрос о строении теории эволюционного управления, который связан с эпистемологическим взглядом на проблему, предполагающим исследование знания как такового, его структуры, функционирования и развития.

1. Содержание понятия “эволюционное управление”

1.1. Общественные типы

Герберт Спенсер [4] предложил классифицировать общества на два противоположных типа – воинственный и промышленный. В *воинственном типе общества* граждане живут под контролем системы *принудительного сотрудничества*, обладают *слепой верой в авторитет* и готовностью быть направляемыми другими, и следовательно, ма-

лой инициативностью, то есть жизнь и деятельность каждого индивида находится в распоряжении общества. Привычка видеть всюду официальное вмешательство развивает уверенность, что оно всюду необходимо, а это делает граждан общества воинственного типа неспособными понимать какие бы то ни было социальные процессы как результат саморегулирующихся порядков. Развитие воинственного типа предполагает *возрастание неизменности общества*, ибо единицы общества подчинены таким связующим, комбинирующим, субординирующим и регулирующим влияниям, которые неизбежно уменьшают их способность менять свои общественные положения, занятия и местожительства.

В *промышленном типе общества* все сделки, будет ли это договор между хозяевами и рабочими, между покупателями и продавцами, между специалистами и теми, кто в них нуждается, – всегда совершаются путем *свободного обмена*. Граждане такого общества находятся в отношениях *добровольной кооперации*, при которой *взаимный обмен услугами не имеет принудительного характера и ни один индивид не подчиняется другому*.

В то время как *большая предприимчивость, меньшая вера в правительство и нежелание подчиняться безответственной власти* указывают на развитое чувство индивидуальности, это более развитое чувство индивидуальности сопровождается *уважением индивидуальности других*. Поскольку индивидуальная деятельность предохраняется от постороннего вмешательства, в промышленном типе общества *исключается возможность деспотически контролирующего деятеля*. Тот контроль, который необходим при промышленном типе, может находиться только *в руках избранного агентства*; для достижения этой цели наилучше приспособлено представительное учреждение. *Режим неизменных иерархических отношений должен замениться системой договоров*, а централизованное управление – “регулирующим аппаратом рассеянного, или нецентрализованного типа”, что придаст промышленному типу общества сравнительную *пластичность*.

Проведя сравнительный анализ этих

двух общественных типов, Г. Спенсер делает вывод о том, что все совершающиеся перемены ведут к *переходу от того общественного порядка, при котором индивиды существуют для государства* (воинственный тип), к *тому порядку, при котором государство существует для индивидов* (промышленный тип). Это предсказание выдающегося ученого, развивавшего идеи всеобщей эволюции, которое было сделано им более ста лет назад, оказалось практически востребованным только в наши дни, поскольку реализация реформ стала возможной благодаря научным и технологическим достижениям XX века, связанным прежде всего с созданием учения о целостности (*холизма*) и разработкой средств компьютерного представления и обработки знаний.

1.2. Холонические системы

В XX веке прослеживается тенденция повышения роли категорий «целое» и «целостность» при исследованиях сложных систем. *Целостность рассматривается как результат динамического взаимодействия составных элементов*, а поэтому система представляет собой несколько иное, чем просто сумма её отдельных компонентов [5]. Я. Смэтс и Дж. Холдейн ввели понятие холизма как учения о целостности, а благодаря О. Шпанну «целостность» превратилась в ведущее понятие социологии [6]. Для объяснения явлений психической жизни гештальт-психология взяла на вооружение принцип целостности, т.е. несводимости элементов психической жизни к простой сумме её составляющих. В современной философии предполагается даже, что категория «целое» может синтезировать в своем содержании такие категории как «материальное» и «идеальное», «объективное» и «субъективное». Всё чаще высказывается утверждение о том, что *целостность лежит в основе эволюции мира, создавая новые целостности* [2].

Высшей формой органической целостности является человеческая личность. Сами по себе, являясь целостностями, люди образуют другие целостности - разнообразные социальные институты, представляющие собой механизмы самоорганизации совместной

жизни людей и призванные удовлетворять определенные общественные потребности. Эта идея эволюционного «выращивания» новых целостностей положена А. Кёстлером в основу понятия «холон» [7], образованного от греческого «holos» - *весь, целый* с суффиксом «on», обозначающим *часть, частицу*. Иными словами, холон, будучи целостностью, одновременно является частью другой целостности.

Сложные системы, построенные на холистических принципах и использующие в качестве базовых элементов холоны, будем называть холоническими сложными системами или, просто, *холоническими системами* (ХС). Каждый холон, являясь своеобразным «строительным блоком» ХС, может преобразовываться, транспортироваться, хранить и/или проверять информацию и физические объекты; он состоит из компонентов для обработки информации и физических операций. Являясь автономным и способным формировать свои собственные планы, стратегии и контролировать их выполнение, холон может кооперироваться с другими холонами в соответствии с определенными правилами, а также быть частью другого холона.

Процессы управления осуществляются в ХС на основе гетерархии, предполагающей обмен информацией и командами между холонами «по горизонтали». Такая гетерархическая организация управления, построенная на переговорах по принципам «каждый с каждым» и «равный с равным», обладает гибкостью и оперативностью, но имеет низкую надежность, поскольку участники кооперации взаимодействуют в рамках временно действующих соглашений и одновременно имеют обязательства перед несколькими различными партнерами. Поэтому для обеспечения относительной стабильности при решении задач, требующих долговременного сотрудничества на основе единоначалия, холоны могут самоорганизовываться во временные иерархии. Таким образом в ХС *гибкость гетерархии сочетается со стабильностью иерархии*.

Соотношения между гетерархической («горизонтальной») и иерархической («вертикальной») составляющими могут быть раз-

личными. Если окружающие условия стабильны и предсказуемы, оправдано преимущественно “вертикальное” управление, а при наличии плохо предсказуемых флуктуаций среды предпочтение должно отдаваться принятию решений «по горизонтали», на основе переговоров равноправных партнеров. В предельном случае, когда иерархическое управление отсутствует, в ХС может быть реализована идея «коммуникативного поведения» Ю. Хабермаса, которое принципиально субъект-субъектно и принимает партнера в качестве самодостаточной ценности. Какие-то иные цели здесь исключаются, что и создает основу для осуществления ненасильственных («не вертикальных») способов социального бытия как «универсального примирения» [2].

Следует отметить, что исследования в области ХС ведутся, в основном, применительно к разработке холонических производственных систем [8, 9] и управлению регионами [10].

1.3. Структура, эволюция и руководство системами

В социальных теориях понятие структуры развивается в оппозиции к понятию социального действия. В одних теориях структура статична, определяется как нечто первичное, независимое от индивидов, а социальное действие оказывается таким образом продуктом структуры. В других наоборот, понятие структуры связывается с динамикой и строится как производное от социального действия и взаимодействия [11].

В холонических системах целостные элементы (холоны) могут самостоятельно (без каких-либо команд “сверху”) устанавливать или разрывать связи между собой, а это означает, что структура подобных систем будет переменной. Однако, как отмечалось выше, холоны могут образовывать на какой-то период времени стабильные иерархии, если это соответствует интересам всех участников кооперации. Поэтому структура ХС в общем случае будет иметь как статическую, так и динамическую составляющие, что предопределяет возможность самоорганизации и эволюции подобных систем.

Будучи способными только в определенных пределах самостоятельно выживать в окружающей среде и адаптироваться к ее изменениям, *холоны взаимодействуют друг с другом, стремясь повысить уровень своей жизнеспособности*. С этой целью некоторые из них (не теряя своей целостности) могут объединяться (интегрироваться) в общие холоны, а другие, наоборот, - распадаться (дифференцироваться) на множество автономных, но имеющих возможность поддерживать связи между собой, холонов. В результате таких перманентных процессов интеграции и дифференциации открытые по своей природе и способные к самоорганизации *холонические системы эволюционируют в направлении усложнения своих структур* [5].

Следует отметить, что данное утверждение соответствует представлениям Г. Спенсера об эволюции, который понимал ее как единство интеграционных и дифференциальных процессов, протекающих при количественном возрастании элементов системы и усложнении ее структуры, как переход “от бессвязной однородности к связной разнородности” [4]. Кроме того, оно согласуется с позицией И. Пригожина и И. Стенгерс, которые, отвечая на вопрос о степени общности эволюционной парадигмы, писали [12], что “она охватывает изолированные системы, эволюционирующие к хаосу, и открытые системы, эволюционирующие ко все более высоким формам сложности”.

Постоянные изменения и усложнение структуры, не санкционированные решениями высшего руководства, могут привести приверженцев традиционной бюрократии к выводу о неуправляемости подобных систем. Однако это не так; более того, справедливо обратное утверждение.

Дело в том, что в командно – административных системах принятие решений является прерогативой и главной функцией руководящих работников, сгруппированных в верхних эшелонах власти, а какая – либо децентрализация управления практически исключается. В открытых самоорганизующихся и эволюционирующих системах *функция руководства становится принципиально иной и сводится к организации и совершен-*

ствованию процессов управления (являющихся синонимом понятия “процессы принятия решений”) [13]. Руководитель устанавливает правила взаимодействия между холонами, определяет ограничения, которые необходимо использовать при принятии решений, выступает арбитром при разрешении конфликтов, анализирует тенденции развития системы в целом и т.п. Холоны же, действуя и взаимодействуя исходя из своих частных интересов, в соответствии с принципом “невидимой руки” Адама Смита направляются к общесистемной цели, которая может быть и не входила в их намерения. При этом устойчивое развитие системы оказывается возможным в условиях значительных флуктуаций среды в отличие от жестких иерархических структур с их четко разграниченным распределением функций, которые не могут оперативно и адекватно реагировать на стихийно складывающиеся, непредусмотренные и трудно предсказуемые ситуации.

1.4. Организация процессов управления

Формирование холонов происходит в соответствии с концепцией социального обмена [2], трактующей суть социальной жизни как *обмен различными типами деятельности с целью удовлетворения потребностей и интересов социальных субъектов*. Образуясь по инициативе этих субъектов холон предлагает свои услуги и может воспользоваться услугами других холонов. Холоны могут кооперироваться (интегрироваться) друг с другом, образуя новые холоны, и, наоборот, распадаться (дифференцироваться), если это ведет к повышению их жизнеспособности. Эволюция холонической системы, таким образом, является результатом переговоров и принятия решений равноправными партнерами. Иными словами, начав свое развитие с неорганизованной совокупности индивидов, система под воздействием процессов управления, имеющих целью обеспечение ее устойчивого развития, эволюционирует в направлении усложнения своей структуры “в чистом виде”, то есть без какого – либо специфического воздействия на нее, навязывающего системе структуру или функ-

ционирование [14].

Однако такая полная самоорганизация и децентрализация на практике встречается чрезвычайно редко, поскольку чаще всего приходится иметь дело с реформированием управления в уже существующих сложных системах, построенных обычно на бюрократических принципах. В этом случае *руководство сохраняется, но изменяет свою функцию, концентрируя свое внимание на организации процессов управления* и делегируя холонам полномочия самостоятельно принимать решения. Такую “мягкую” функцию руководства может, например, выполнять предложенный в работе [9] *штабной холон* (staff holon).

Концепция штабных холонов допускает наличие в архитектуре холонической системы централизованных элементов и функциональности. Это, с одной стороны, обеспечивает возможность плавного перехода от старых бюрократических к новым эволюционным методам управления, а с другой стороны, оказывается полезным для тех задач, которые слишком сложно решать в распределенной холонической системе. Штабные холоны также обеспечивают другие (будем их называть основными) холоны общесистемной информацией, необходимой для принятия ими решений, более адекватных действительности. С этой точки зрения штабные холоны могут рассматриваться как внешние эксперты, которые дают советы основным холонам.

Если ситуация остается достаточно стабильной, штабные холоны могут давать полезные советы, но в тех случаях, когда система подвергается значительным воздействиям среды и существенным изменениям, советы могут быть ошибочными, и тогда основные холоны будут их игнорировать, самостоятельно принимая решения. Такой подход к организации управления дает возможность реализовать все три типа управления – иерархическое, гетерархическое и смешанное. В отличие от иерархических систем, базирующихся на отношении “начальник – подчиненный”, в гетерархических системах происходит обмен информацией и командами с использованием некоторого протокола переговоров.

“Протокол контрактной сети” – наиболее известный пример такого механизма переговоров [15]. Он состоит из пяти этапов: (1) назначение задания менеджером; (2) оценивание задания потенциальными контракторами; (3) потенциальные подрядчики соревнуются для того, чтобы получить это задание; (4) менеджер задания передает контракт одному из соревновавшихся подрядчиков; (5) и, наконец, менеджер и подрядчик ведут между собой переговоры для выполнения задания по контракту.

Основные холоны могут быть классифицированы в зависимости от сферы применения. Так, например, холонические производственные системы (ХПС) могут быть построены на базе трех типов основных холонов: холон заказа, холон изделия и холон ресурсов [9]. Холон заказа представляет задачу в производственной системе. Он отвечает за выполнение порученной работы верно и в срок и осуществляет управление производимым изделием, моделью состояния изделия и обработкой всей логистической информации. Иными словами, этот холон исполняет задания, которые традиционно давались диспетчеру, контроллеру процессов и краткосрочному планировщику.

Холон изделия содержит в себе знания о процессе и изделии, чтобы гарантировать правильное производство изделия с достаточным качеством. Холон изделия обладает информацией о жизненном цикле изделия, требованиях пользователя, проекте, планах процессов, стоимости материалов, процедурах контроля качества и т.д. Таким образом, он содержит модель изделия и сочетает в себе функции, которые традиционно относятся к проектированию изделия, планированию процессов и гарантии качества.

Холон ресурсов содержит некоторый ресурс производственной системы и компонент обработки информации, которая управляет этим ресурсом. Он предлагает свои производственные мощности окружающим его холонам. Он обладает методами размещения производительных ресурсов, знаниями и процедурами для организации, использования и управления этими производительными ресурсами для выпуска продукции. Холон ре-

сурсов – это некоторая абстракция средств производства, таких как завод, мастерская, станки, конвейеры, трубопроводы, склады, персонал, энергия, площадь помещений и т.п.

Важнейшую роль в организации процессов управления играет интеграция знаний в рамках специальным образом разработанной компьютерной среды. Решению этой проблемы посвящены работы [16, 17, 18].

1.5. Принципы эволюционного управления

Резюмируя вышеизложенное, можно сформулировать основные принципы, обеспечивающие возможность эволюционного управления в сложных системах.

- Использование (целостного) *холистического подхода* к построению сложных систем, позволяющего сочетать гибкость гетерархического управления с жесткостью иерархического.

- Понимание *управления как функции сложных открытых систем, направленной на упорядочение, сохранение и повышение их целостности*, а также включение в понятие “управление” процессов *самоорганизации*, где управление является необходимым *внутренним свойством* системы (следует отметить, что такой взгляд отличается от традиционного используемого, при котором разделяются управляемая система и управляющий субъект, а управление оказывается внешним по отношению к системе фактором) [19, 20].

- *Приспособление структуры системы к деятельности холон*ов в отличие от традиционных (бюрократических) систем, в которых неизменная структура навязывает деятельность и функционирование.

- *Повышение уровня жизнеспособности холон*ов как основная цель их взаимодействия, предопределяющая интеграцию в общие холоны и дифференциацию на множество автономных холонов.

- Рассмотрение *эволюции в направлении усложнения структуры системы* как результата перманентных процессов интеграции и дифференциации.

- Применение *концепции социального об-мена*, трактующей суть социальной жизни как

обмен различными типами деятельности с целью удовлетворения потребностей и интересов социальных субъектов.

- *Сведение функции руководства к организации и совершенствованию процессов управления* (процессов принятия решений) в отличие от командно – административных систем, в которых принятие решений является их прерогативой и основной функцией.
- *Признание устойчивого развития сложной системы как главного критерия качества управления.*
- *Осознание важнейшей роли интеграции знаний в организации управления и необходимости создания специальной компьютерной среды* (системы компьютерной интеграции знаний) для поддержки процессов принятия решений.
- *Понимание конечной цели реформирования управления как перехода от того общественного порядка, при котором индивиды существуют для государства, к тому порядку, при котором государство существует для индивидов.*

2. Структура теории эволюционного управления

2.1. Онтология процессов управления

Онтология представляет собой совокупность терминов и взаимосвязанных определений, относящихся к некоторой предметной области и обладающих *нормативной ролью*. В любой онтологии *каждое определение требует полного понимания в отношении с другими определениями этой онтологии*. Поэтому определения онтологии отличаются от определений в обычных словарях, трактующих каждое слово (термин) в отдельности.

Онтология предназначена для *осуществления коммуникаций между людьми, между людьми и компьютерами, а также между вычислительными средствами*. Для того чтобы определения онтологии были выражены, по возможности, точным языком, они конструируются на основе ограниченного набора базовых терминов, называемого *мета-онтологией*, таких как СУЩНОСТЬ, ОТНОШЕ-

НИЕ, АТРИБУТ и РОЛЬ [21].

Неформальная онтология, построенная с использованием естественного языка, затем транслируется в формальный язык, например, ОНТОЛИНГВА. Следует отметить, что термин ОНТОЛИНГВА может относиться не только к языку представления онтологии, но и к программной системе, которая используется для его разработки и манипулирования с ним. Однако для обозначения программной системы часто используется отдельное понятие “сервер онтологии” [21].

Онтология процессов эволюционного управления в сложных системах должна охватывать весь спектр терминов и определений, относящихся к процедурам подготовки, принятия и оценки возможных последствий реализации принятых решений. Управление осуществляется людьми, принимающими решения, хотя, в принципе, возможно применение для выполнения этой функции некоторых “разумных” автоматов. Принять решение – значит прийти к какому-нибудь выводу, к необходимости каких-нибудь действий в результате обдумывания, рассуждений, то есть в результате решения задачи (или совокупности задач).

Исходя из сказанного, можно выделить ряд терминов онтологии процессов управления: УПРАВЛЕНИЕ, ПРОЦЕСС, РЕШЕНИЕ, ДЕЙСТВИЕ, ЗАДАЧА, РАССУЖДЕНИЕ, ВЫВОД, ЧЕЛОВЕК, АВТОМАТ. Если коснуться целей управления, то появятся понятия УСТОЙЧИВОСТЬ, РАЗВИТИЕ, ЭВОЛЮЦИЯ, СОСТОЯНИЕ, а применительно к организации сложной системы – ЭЛЕМЕНТ, СТРУКТУРА, СВЯЗЬ и т.п. Всем этим (и многим другим) терминам должны быть даны определения, для полного понимания которых, как отмечалось выше, необходим учет их отношений с другими определениями онтологии, и, поэтому все определения онтологии процессов управления будут взаимосвязаны между собой, взаимозависимы.

Онтология представляет собой концептуальный фундамент теории эволюционного управления сложными системами, ее понятийное “ядро”. Однако, в отличие от классической теории, в которой идеализированные объекты содержат признаки, не соответ-

ствующие реальности (например, материальная точка, не имеющая размеров, но обладающая массой), *онтология строится на основе описания бытия*. Более того, поскольку сложные системы эволюционируют в изменяющемся окружении, онтология должна быть доступна для пополнения новыми понятиями, то есть должна являться *открытой концептуальной системой*.

2.2. Ситуационный эмпирический базис

Одним из наиболее распространенных подходов к эволюционному управлению сложными системами является принятие решений на основе *прецедентов* или *ситуаций (case)*, имевших место ранее и служащих оправданием для принимаемых решений. Совокупность всех зафиксированных в процессе функционирования сложной системы прецедентов образует её *ситуационный эмпирический базис* [20]. При этом используется гипотеза о монотонности пространства решений: “Похожие входные ситуации приводят к похожим выходным реакциям системы”. Для каждой новой ситуации достаточно найти (из числа зафиксированных) одну или несколько самых близких, похожих на неё ситуаций и принимать решение, опираясь на эти прецеденты. При таком подходе, конечно же, сложная система познаётся не настолько глубоко, чтобы уметь предсказывать её реакцию на любые возможные внешние воздействия [22].

Тем не менее, в зарегистрированной ситуации во взаимосвязи наблюдаемых событий и фактов может содержаться ценная обобщенная информация, характеризующая в неявной форме результаты взаимодействия сложной системы со средой, которые не были доступны для непосредственного восприятия и анализа. Поэтому рассуждения на основе прецедентов (*case-based reasoning*) с целью принятия решений играют важную роль в процессах управления сложными системами.

Каждая ситуация, по существу, представляет собой некоторое *знание*, которое приобретается путем систематизации и обобщения отдельных разнородных фактов. Процедура приобретения знаний (*knowledge acquisition*)

осуществляется специалистами-экспертами, которые не только фиксируют ситуацию (“в таком-то месте, в такое-то время, при таких-то условиях произошёл такой-то случай”), но осуществляют анализ и выявляют причину её появления, оценивая полноту и непротиворечивость имеющейся информации. После этого инженеры по знаниям (*knowledge engineers*) преобразуют эти специальные знания в машинный формат и осуществляют их накопление в памяти компьютеров с целью последующего использования в процессах принятия решений.

Ситуационный эмпирический базис представляет собой следующую (после онтологии) эпистемологическую составляющую теории эволюционного управления - одну из подсистем *компьютерной среды*, в рамках которой реализуется вся теория [20]. Этот эмпирический базис может последовательно накапливаться, например, в форме WEB-страниц в стандарте ИНТЕРНЕТ, а рассуждения и выводы – осуществляться лицами, принимающими решения. В то же самое время уместно отметить, что в 90-е годы в сфере искусственного интеллекта получили развитие работы в области автоматизации рассуждений и выводов на основе прецедентов [23].

2.3. Система ограничений

Принятие решений в сложных системах осуществляется в условиях самых разнообразных ограничений – финансово-экономических, юридических, технологических, экологических и многих других. Качество (в широком смысле - эффективность) решения зависит от того, в какой степени информированы об этих ограничениях лица, принимающие решения. Поэтому важной составной частью теории эволюционного управления сложными системами является *система ограничений*.

Ограничения делятся на два класса - явные и неявные. Явные ограничения выражаются в форме различных законов, стандартов, и нормативов, определяющих возможность или невозможность выполнения тех или иных действий или операций. К этому же классу относятся ограничения, указывающие допустимые изменения какой-либо функции

в пределах заданного диапазона изменений аргумента, а также простые неравенства. Такие ограничения, будучи зафиксированными на каком-нибудь носителе, могут быть использованы непосредственно, без каких-то дополнительных преобразований. Вопрос состоит только в их выявлении и регистрации.

Гораздо сложнее дело обстоит с неявными ограничениями, получаемыми обычно с помощью моделирования, что привело к появлению термина “моделирование на основе ограничений” (constraint-based modeling). Подобные средства моделирования “первой волны”, к числу которых относится, например, линейное программирование, используют соотношения между переменными в форме математических уравнений, решаемых чаще всего численными методами. В отличие от них, средства “второй волны” - *сети ограничений* (constraint networks) - опираются на логику и символные представления, что позволяет получать допустимые (не обязательно оптимальные) решения [24].

В конечном счете, для того, чтобы сделать неявные ограничения явными, необходимо построить ту или иную *частную модель* сложной системы. Если прецеденты являются своеобразным “срезом”, фиксирующим (на основе наблюдений) состояние сложной системы в какой-либо момент времени “в целом”, то частная модель представляет собой описание поведения системы с определенной точки зрения, с позиций некоторой теории. Поэтому можно говорить о множестве частных моделей – экономических, социальных, экологических, физических и др. – одной и той же сложной системы, каждая из которых может использоваться для нахождения неявных ограничений в процессах принятия решений.

Например, с помощью экономических моделей промышленного предприятия можно принимать решения относительно путей повышения его эффективности, экологические модели могут служить основанием для выработки мер по обеспечению экологической безопасности, на базе физических моделей можно обосновать вывод о возможности использования новых материалов в

процессе производства того или иного изделия и т.д.

“Спектр” частных моделей широк и разнообразен. Результаты каждого “частного” моделирования при их совместном использовании могут порождать противоречивые требования в процессе принятия решений и выработке управляющих воздействий. Ясно, например, что реализация мер по улучшению экологической обстановки и освоению в производстве новых материалов увеличивает затратную часть бюджета предприятия, отрицательно сказываясь на экономических показателях в настоящем. Однако в будущем эти вложения могут не только оправдать себя, но и сделать предприятие более рентабельным путём сокращения штрафов за превышение экологических нормативов и уменьшения расходов при серийном производстве изделия с использованием новых материалов. Поэтому выбор из возможного множества альтернатив на основе “заглядывания” в будущее может потребовать построения дополнительных моделей прогнозирования развития предприятия. Подобная схема получения ограничений для принятия решения известна под названием “рассуждений на основе моделей” (model-based reasoning) и является одним из направлений исследований в области построения интеллектуальных систем (см., например [25]).

Интегрированные модели [26] имеют преимущества перед частными, поскольку строятся с применением междисциплинарных *инженерных теорий* [16,18], ядром которых являются *базы знаний, ориентированные на ограничения* (constraint-oriented knowledge base) [27].

С учетом того, что теория эволюционного управления сложными системами является открытой концептуальной системой, должна быть решена проблема построения *эволюционирующих баз знаний* [28].

2.4. Исчисление

Исчисление теории, представляющее собой множество правил вывода, с помощью которых осуществляется решение задач, содержит *формальные процедуры*, реализуемые с применением компьютеров, и *неформаль-*

ные *умозаключения* лиц, принимающих решения [3]. Формальная составляющая базируется как на классических (дифференциальном, интегральном, матричным и т.п.) исчислениях, так и на методах и средствах искусственного интеллекта, включая упомянутые выше рассуждения на основе прецедентов и моделей. Неформальные выводы могут осуществляться одним человеком самостоятельно или группой лиц путем многосторонних переговорных процессов.

Поскольку в сложных системах редко удается находить точные и оптимальные решения, на передний план *выдвигается проблема удовлетворения ограничений*, то есть нахождения допустимых вариантов решений, которые соответствуют сформулированным требованиям. С этой целью создаются разнообразные *решатели ограничений* (constraint solvers), в том числе программные средства для автоматической генерации интегрированных компьютерных моделей объектов [29] с использованием баз знаний, ориентированных на ограничения [27]. Иными словами, применяется достаточно емкий арсенал разнообразных средств поддержки процессов индивидуального принятия решений.

В то же самое время при эволюционном управлении сложными системами чаще всего приходится решать задачи *коллективного взаимодействия и коллективного выбора*. Главной особенностью этих задач является то, что участники коллектива, несмотря на наличие общих целей, могут иметь различные вкусы и противоречивые интересы, по-разному оценивая свои коллективные действия и их исходы [30]. Для достижения компромисса они вступают в *переговоры*, которые могут быть длительными, утомительными и не всегда конструктивными. Поэтому возникает задача *моделирования процессов коллективного взаимодействия* как основы для решения проблемы коллективного выбора. С этой целью предлагается подход, использующий концепцию *мультиагентных систем* [31].

В самом общем виде понятие “агент” можно определить как компонент программного обеспечения, способный должным об-

разом действовать при решении задач от имени своего пользователя. Агенты обладают *автономностью*, то есть способностью действовать самостоятельно без участия человека, а это означает, что у них есть внутренние состояния и цели, а их действия, производимые от имени пользователя, направлены на достижение этих целей. Агенты могут *брать на себя инициативу* вместо того, чтобы просто реагировать на изменения среды, и *взаимодействовать с другими агентами* посредством некоторого языка коммуникаций. Агентов называют *интеллектуальными*, если они способны *обучаться* в процессе взаимодействия с окружением.

Главной особенностью мультиагентных систем (МАС) является то, что агенты в них *обмениваются сообщениями на уровне знаний*, поскольку МАС реализуются обычно в виде сети взаимосвязанных модульных программных систем, *базирующихся на знаниях*. Решение задачи при этом осуществляется не путем прямых дедуктивных выводов, а в результате серии переговоров агентов друг с другом, в ходе которых они могут согласовывать и уточнять свои требования и ограничения. Эта способность МАС к решению задач коллективного выбора делает их важнейшей составной частью исчисления теории эволюционного управления сложными системами. Если же применение МАС не дает приемлемых результатов, то в работу включаются “неформальные составляющие исчисления” - лица, принимающие решения.

2.5. Метазнания

Теория эволюционного управления сложными системами, включающая в себя онтологию, ситуационный эмпирический базис, систему ограничений и исчисление, которые “погружены” в специальную *компьютерную среду (КС)*, представляет собой *систему знаний*, организованных, в свою очередь, достаточно сложным образом. Эта система является развивающейся, то есть постоянно пополняемой новыми знаниями, поскольку управляемая система эволюционирует в изменяющемся окружении. Поэтому важ-

ную роль играет *интеграция знаний* – приобретение, верификация, накопление знаний в КС и обеспечение доступа к ним со стороны пользователей [3,20].

Для решения проблемы эффективного взаимодействия лиц, принимающих решения, с КС необходимо вооружить их *мета-знаниями*, то есть знаниями о том, как организованы знания в КС и о технологиях работы с ними. Поскольку теория эволюционного управления необходима для поддержки процессов принятия решений, основной функцией метазнаний является *обеспечение пользователей информацией по управлению решением задач* с использованием знаний, накопленных в КС. Поэтому и метазнания должны быть включены в теорию управления сложными системами.

Ключевую роль в метазнаниях играет понятие “*задача*” – всякая ситуация, требующая от субъекта (человека) некоторых действий. В более общем смысле под задачей понимается ситуация, определяющая действия некоторой *решающей системы* [32]. В нашем случае в качестве решающей системы выступает совокупность лиц, принимающих решения, и методов и средств решения задач, накопленных в КС.

Любая задача, как некоторое “незнание”, описывается в терминах существующего знания, являясь его неотъемлемым “дестабилизирующим” компонентом, направляющим процессы познания к получению нового знания. Иными словами, *задача* – это “*знание о незнании*”. Такая трактовка связана с тем, что, изучая образовавшуюся проблемную ситуацию, человек, прежде всего сталкивается с феноменом “непонимания”. Через попытки понять проблему он формулирует задачу, то есть переводит “непонимание” в “незнание”, а в результате решения задачи он приобретает знание [11].

Описание задач необходимо осуществлять с помощью декларативных формулировок, поскольку они выражают фактическое знание чисто повествовательным образом независимо от его будущего использования. В отличие от процедурного подхода при декларативном описании задач структура управления полностью отделена от информации,

вводимой в форме правил, и поэтому эти правила могут вводиться в беспорядке. В этом случае отсутствие упорядоченности является положительным свойством.

Поскольку механизмы управления решением задач достаточно подробно описаны в работе [33], в данной статье они не рассматриваются.

Заключение

Реформирование традиционных командно – административных систем управления необходимо проводить в направлении использования методов и средств эволюционного управления.

В основу построения теории эволюционного управления сложными системами целесообразно положить холистический (целостный) подход, позволяющий сочетать в процессах управления гибкость гетерархии со стабильностью иерархии.

В структуре теории предлагается выделить онтологию процессов управления, ситуационный эмпирический базис, систему ограничений, исчисление и метазнания, предназначенные для обеспечения пользователей информацией по управлению решением задач.

Указанные эпистемологические составляющие теории эволюционного управления сложными системами необходимо объединить в единую развивающуюся систему знаний в рамках специальным образом организованной компьютерной среды.

Интеграция знаний предполагает их постоянное приобретение, верификацию, накопление в компьютерной среде и обеспечение доступа к ним со стороны пользователей.

Исчисление теории эволюционного управления сложными системами должно базироваться как на формальных процедурах, реализуемых с применением компьютеров, так и на неформальных умозаключениях лиц, принимающих решения.

С целью моделирования процессов коллективного взаимодействия и коллективного выбора целесообразно использовать мультиагентные системы, реализуемые в виде сети взаимосвязанных модульных программных систем, базирующихся на знаниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краткий словарь по логике. М.: Просвещение, 1991.
2. Новейший философский словарь. Мн.: В.М. Скакун, 1998.
3. *Vittikh V.A.* Towards creating of control theory for open organizational systems. // Proceedings of the 2-nd International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems". Samara: SSC RAS, 2000.
4. *Спенсер Герберт.* Синтетическая философия: Пер. с англ. К.: Ника-Центр, Познание №2, 1997.
5. *Саати Т., Кернс К.* Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991.
6. Философский энциклопедический словарь. М.: ИНФРА-М, 1997.
7. *Kostler A.* The Ghost in the Machine. London: Arcana books, 1989.
8. *Dong J., Shi Y., Liu H.* A Holonic Manufacturing Framework for Concurrent Engineering and Enterprise Integration // Proceeding of the International Conference on Concurrent Engineering. Washington D.C., 1995.
9. *Van Brussel H., Valckenaers P., Bongaerts L., Peeters P.* Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. Computers in Industry. 1998. № 37.
10. *Тумов К.А., Виттих В.А., Логойдо Ю.М., Савельев С.Н.* Холистический подход к управлению регионом. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды II Международной конференции. Самара: Самарский научный центр РАН, 2000.
11. Современный философский словарь. М.: Одиссей, 1996.
12. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса (новый диалог человека с природой). М.: Прогресс, 1986.
13. *Джонсон Р., Каст Ф., Розенцвейг Д.* Системы и руководство (теория систем и руководство системами). М.: Советское радио, 1971.
14. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991.
15. *Smith R.G.* The contract net protocol: high – level communication and control in distributed problem solver. IEEE Transactions on Computers. 1980. №29 (12).
16. *Vittikh V.A.* Engineering theories as a basis for integrating deep engineering knowledge. // Artificial Intelligence in Engineering. 1997. V.11. №1.
17. *Виттих В.А.* Управление открытыми системами на основе интеграции знаний. // Автометрия. 1998. № 3.
18. *Виттих В.А.* Интеграция знаний при исследованиях сложных систем. // Известия академии наук. Теория и системы управления. 1998. № 5.
19. *Берков В.Ф., Яскевич Я.С., Павлюкевич В.И.* Логика (учебные пособия для ВУЗов). Минск: ТетраСистемс, 1997.
20. *Виттих В.А.* Концепция управления открытыми организационными системами. // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. № 1.
21. *Uschold M., King M., Moralee S., Zorgios Y.* The Enterprise Ontology. // The Knowledge Engineering Review. 1998. v.13. №1.
22. *Загоруйко Н.Г.* Прикладные методы анализа данных и знаний. // Новосибирск, Изд-во Института математики СО РАН, 1999.
23. *Oxman R.E.* INDEX: a case-based reasoning approach of content-based indexing for design. // Proceeding of the VIII International Conference on Application of Artificial Intelligence in Engineering, Toulouse, France, 1993. V.1.
24. *O'Grady P., Young R.E.* Issues in concurrent engineering systems. // Journal of Design and Manufacturing. 1991. V.1. №1.
25. *Kalkani E.C.* Model - based reasoning in selecting characteristic daily load curves for power system prisihg update. // Proceeding of the IX International Conference on Application of Artificial Intelligence in Engineering, Pennsylvania, USA, 1994.
26. *Виттих В.А., Смирнов С.В.* Интегрированные модели артефактов в согласованной инженерной деятельности. // Труды VI Национальной конференции по искусственному интеллекту. Пущино: РАИИ, 1998. Т.2.
27. *Budyachevsky I.A., Vittikh V.A.* A constraint-oriented knowledge base for modeling and

- simulation in concurrent engineering. // Proceedings of the International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications. Washington D.C., 1995.
28. *Meyer M.* Issues in Concurrent Knowledge Engineering: Knowledge Sharing and Knowledge Evolution. // Proceedings of the International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Pennsylvania. Pittsburg, 1994.
29. *Budyachevsky I.A., Vittikh V.A.* A knowledge-based system for automated generation of engineering models. // Proceeding of the IX International Conference on the Application of Artificial Intelligence in Engineering. Pennsylvania, 1994.
30. *Емельянов С.В., Нанпельбаум Э.Л.* Методы управления сложными системами. Принципы рациональности коллективного выбора. // Техническая кибернетика. М.: ВИНТИ, 1978. Т.10.
31. *Vittikh V.A., Skobelev P.O.* Multy-agent systems for modeling of self-organization and cooperation processes. // Proceedings of the XIII International Conference on the Application of Artificial Intelligence in Engineering. Galway. 1998.
32. *Глушков В.М. и др.* Человек и вычислительная техника. Киев: Наукова думка, 1971.
33. *Лорьер Ж.Л.* Системы искусственного интеллекта. М.: Мир, 1991.

EVOLUTIONARY CONTROL OF COMPLEX SYSTEMS

© 2000 V.A.Vittikh

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara

The concept of evolutionary control is introduced for open composite systems and its content is uncovered. The necessity of creation of the theory of evolutionary control on the basis holistic (integrated) approach is substantiated. The pattern of this theory including an ontology of control procedures, situational empirical base, system of limitations, calculus and metaknowledge intended for supplying of the users with the information for control by problem solving is offered. The necessity of join enumerated components in a uniform developing system of knowledge in frameworks by a special organized computer environment is shown. The significance of integration problem of knowledge suspected their continued acquisition, verification, accumulation inside computer and providing of access to them users is underlined. It is affirmed, that the calculus of the theory of evolutionary control of complex systems should be based both on formal procedures realized with computers, and on informal conclusions of persons who takes a decisions. For simulation of processes of collective choice the expediency of usage multiagent systems realized by the way of a web of the interdependent modular program systems, basing on knowledge is justified.

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

© 2000 С.В. Смирнов

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Обсуждается тезис “онтологической относительности” в контексте исследования взаимосвязей эпистемологических единиц предметно-ориентированных систем моделирования. Указывается естественный в технологической системе прием редукции множества эпистемологических единиц: конструирование рекурсивных концептуальных схем. Описывается соответствующая “схема схем” и рассматриваются вопросы ее использования.

Введение

Онтологический подход к решению *проблемы компьютерной интеграции знаний при исследовании сложных систем* [1] – сравнительно новое направление в искусственном интеллекте. С построением *онтологий* связывается организация системы знаний об актуальной предметной области (ПрО) и способах их целевого использования [2, 3]. Онтологии являются важной составной частью перспективной теории управления сложными системами [4].

Применение онтологического подхода в задачах компьютерного моделирования сложных систем позволило четко выделить фундаментальные типы эпистемологических единиц технологии моделирования и разработать принципы управления разнородными знаниями при подготовке и проведении вычислительного эксперимента [5, 6]. В философском плане эти результаты могут быть интересны не только в силу актуальности (по крайней мере, в естествознании) проблемы размежевания теорий с одной стороны и моделей с другой [7], но и как пример прагматической рефлексии известного в аналитической философии принципа онтологической относительности.

Представление об *онтологической относительности*, когда “наше знание об объектах, описываемых на языке одной теории, можно рассматривать лишь на языке другой теории, который в свою очередь, должен рассматриваться в отношении к языку следующей теории, и так далее до бесконечности”, известно как тезис Куайна [8]. В технологи-

ческой системе моделирования это положение должно быть опровергнуто хотя бы по причине ограниченности вычислительных ресурсов. Представляет интерес рассмотреть способ конструирования такого языка концептуальной спецификации, который обеспечил бы (на приемлемом для пользователя уровне) обрыв онтологической цепочки, а именно: обеспечил бы и самоописание, и спецификацию любой другой онтологии.

Концептуальные схемы и денотативные модели предметных областей

Интуитивно ясную иллюстрацию тезису Куайна дает рис. 1а. Одностороннего усечения онтологической цепочки можно достичь, вводя в нее рекурсивную эпистемологическую конструкцию (рис. 1б). Дальнейшая редукция множества эпистемологических единиц требует уточнения их семантики в зависимости от их относительного положения в онтологической цепочке. В этой связи в [5] по существу предложена минимальная “2,5-уровневая” система моделей ПрО (рис. 1в).

В *концептуальной модели*, или *схеме*, абстрагируется существо моделируемых объектов и их взаимосвязи, т.е. фактически строится *представление* [9], которое отличается от теории, быть может, лишь частичной замкнутостью множества аксиоматических положений, формирующих концептуальную схему (часто “замыкание” в широком понимании его смысла составляет интерес собственно компьютерного моделирования). Именно концептуальная (К-) модель отождествляется с онтологией ПрО. Эта модель как

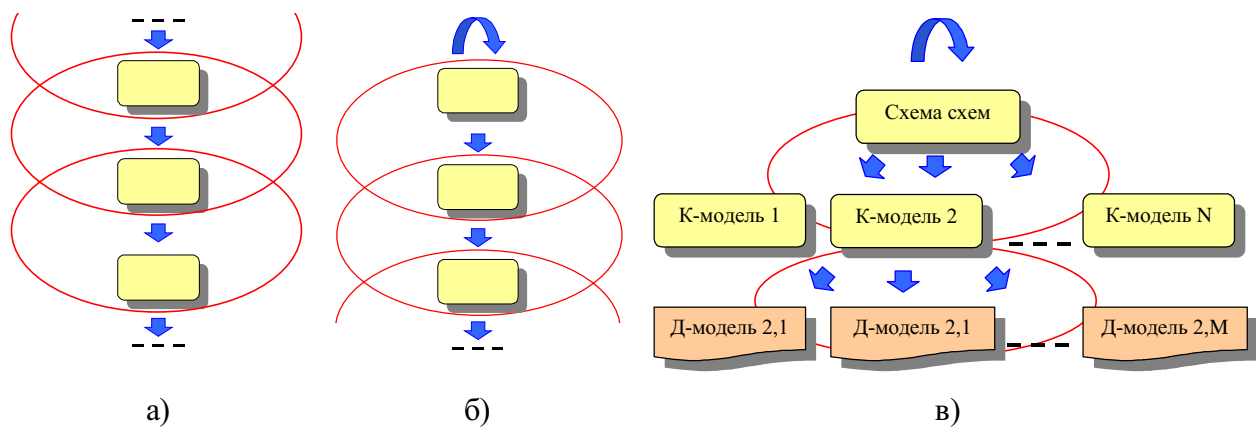


Рис. 1. Онтологическая цепочка Куайна и ее редуцирование в технологической системе моделирования

онтология актуальна для определенного круга субъектов, разделяется этим коллективом субъектов, действует как средство коммуникации и обладает нормативной ролью в процессе их совместного “освоения” (моделирования, проектирования, изучения и т.п.) ПрО [5, 6].

В объектных, или денотативных (Д-), моделях производится отражение, воспроизведение, описание конкретного объекта или системы объектов ПрО, выполняемое в рамках избранной онтологии. Возможная трактовка Д-модели как онтологической базы для моделирования выводится из-под контроля технологической системы моделирования и целиком является прерогативой пользователя. Вместе с тем, в подобную систему вводится рекурсивная онтология – “Схема схем”; построенные на ее основе Д-модели интерпретируются в системе моделирования как К-модели [5].

Таким образом, в технологической системе моделирования может поддерживаться минимально полная среда представления знаний. Она возникает путем редукиции бесконечномерной онтологической цепочки за счет введения рекурсивной Схемы схем и внутрисистемной фиксации семантики различных эпистемологических единиц, имеющих общий формат представления.

Атомистические принципы представления данных в системах моделирования

В программировании систем искусственного интеллекта широкое применение находит фундаментальная концепция представления и обработки информации на осно-

ве объединения, деления и перегруппировки списков некоторых элементарных объектов – атомов, которые, в свою очередь, служат для представления имен или чисел. Имеются основания считать, что эти идеи, реализованные Дж. Маккарти в языке Лисп еще в 1960 г., для эффективного использования в задачах моделирования сложных систем целесообразно “погрузить” в оболочку более высокоуровневых и привычных для системных аналитиков теоретико-графовых понятий [10], которые, тем не менее, столь же “прозрачны” с логических и теоретико-множественных позиций. Поэтому избранный нами базовый уровень представления и обработки данных основывается на следующих принципах:

1. Атомистическая единица, или объект, является контейнером, содержащим, по меньшей мере, слот для имени объекта.
2. Всякий объект может обладать произвольным числом валентностей, характеризующих способность объекта вступать в связь с другими объектами. Каждой валентности соответствует одна и только одна инверсивная (обратная) валентность.
3. Связь между двумя объектами может быть установлена лишь тогда, когда эти объекты обладают взаимно-обратными валентностями; других ограничений на связывание объектов не существует.

Нетрудно видеть, что эти положения дают возможность представлять раскрашенные орграфы, вершины которых суть объекты, а дуги – связи между объектами.

Формальная логико-алгебраическая спецификация графов как структур данных, обоб-

щающих списки, известна в литературе (например, [11]; об алгебраическом подходе к спецификации абстрактных типов данных см. [9, 12]). Дополненная несложной реализацией концепции валентности она составляет основу нашего подхода к представлению и обработке информации на нижнем уровне представления и обработки данных при моделировании сложных систем.

Схема схем

Для описания онтологий естественным признается объектно-ориентированный стиль представления знаний [2, 13], который изначально формировался под воздействием классической логики и аналитической философии [14, 15]. Поэтому Схема схем - К-модель ПрО, связанная с представлением и манипулированием онтологиями, - должна, как минимум, описывать три категории:

1. КЛАСС (класс объектов);
2. АТРИБУТ (определяющее свойство объекта, в частности, метод, или способность [16]);
3. ОТНОШЕНИЕ (ограничиваются бинарными отношениями).

При описании схем между денотатами этих предметных категорий складываются отношения, которые неформально могут быть охарактеризованы следующими утверждениями:

1. КЛАСС-объект имеет произвольное конечное множество атрибутов;
2. КЛАСС-объект участвует в любом конечном числе отношений с КЛАСС-объектами;
3. КЛАСС-объект может наследовать от множества других таких объектов и быть предком любого, вообще говоря, количества КЛАСС-объектов;
4. АТРИБУТ-объект характеризует один и только один КЛАСС-объект;
5. ОТНОШЕНИЕ-объект всегда связан с хотя бы одной парой КЛАСС-объектов, один из которых указывается как 1-й аргумент, другой – как 2-й аргумент описываемого бинарного отношения.

Этих фактов достаточно для построения ER-диаграммы Схемы схем, приведенной на рис.2, где классы объектов изображаются вершинами, а межклассовые отношения – дугами. В легендах дуг префикс имени отношения указывает ограничения на реализацию

этого отношения для 1-го аргумента (т.е. класса, являющегося источником дуги), а постфикс – для 2-го аргумента (т.е. класса-стока дуги).

Любая Д-модель, регламент конструирования которой определяет Схема схем, является схемой. Формальное обоснование этого утверждения, а также того, что Схема схем в рассматриваемом смысле рекурсивна, устанавливается на основе логико-алгебраического описания концептуальной схемы, выполненного в [17]¹.

Самоопределение Схемы схем иллюстрирует и рис.3, где приведена ее Д-модель, реализованная на основе избранных нами базисных структур представления и обработки данных (см. п.2).

Вершины графа на рис. 3 показывают все объекты ПрО “Схема схем”. Это денотаты трех разных классов: КЛАСС-объекты “КЛАСС”, “АТРИБУТ” и “ОТНОШЕНИЕ”; АТРИБУТ-объекты “ИмяТипа”, “iКоордината” и “jКоордината”; ОТНОШЕНИЕ-объекты “ИмеетАтрибут”, “ИмеетПодкласс”, “ИмеетАргумент№1” и “ИмеетАргумент№2”.

Каждый КЛАСС-объект имеет слоты *iКоордината* и *jКоордината*, которые носят сугубо вспомогательный характер и используются при отображении ER-диаграммы схе-

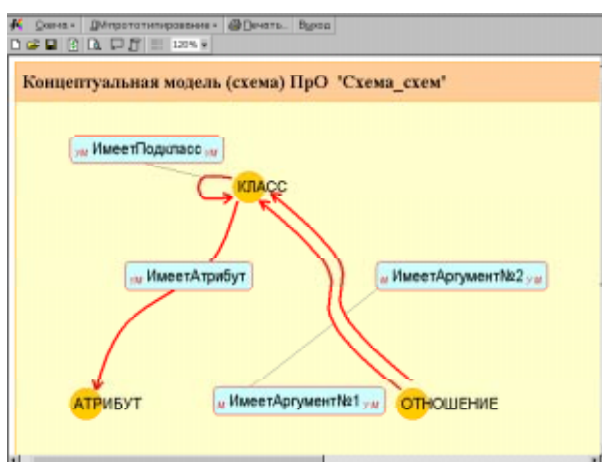


Рис. 2. ER-диаграмма Схемы схем

“У” - условная реализация связи: “для объекта данного класса связь с объектом смежного класса может оставаться нереализованной”, иначе - “должна быть реализована хотя бы один раз”

“М” - множественная реализация связи: “для объекта данного класса связь может быть реализована одновременно более чем с одним объектом смежного класса”, иначе – “не более чем с одним объектом смежного класса”

мы на плоскости (рис. 2). КЛАСС-объекты снабжаются указанными слотами в силу связи КЛАСС-объекта “КЛАСС” с АТРИБУТ-объектами “iКоордината” и “jКоордината”. В свою очередь каждый АТРИБУТ-объект располагает слотом *ИмяТипа* вследствие связи КЛАСС-объекта “АТРИБУТ” с АТРИБУТ-объектом “ИмяТипа” (эти слоты АТРИБУТ-объектов заполнены надлежащими значениями имен *предопределенных типов данных*; о типах такого рода в подобных спецификациях см. [9, 11, 12]).

Межклассовые отношения (изображены на рис. 3 сплошными стрелками) отображаются в Д-модели ОТНОШЕНИЕ-объектами, которые обеспечивают интеграцию данных о реализации отношений, в частности, информацию об ограничениях на реализацию (способ ее представления не является существенным).

Очевидно, что стандартная операция порождения объектов в алгебре схем должна снабжать новый объект набором априорных валентностей, определяемых составом межклассовых отношений, в которых состоит класс порождаемого объекта. Тогда нетрудно понять, почему в Д-модели Схемы схем набор априорных валентностей любого КЛАСС-объекта эквивалентен набору валентностей КЛАСС-объекта “КЛАСС” (на рис. 3 априорные валентности объектов размещены у вершин слева

вверху, а дополнительно приобретаемые при построении модели – слева внизу). Аналогичное объяснение имеет состав априорных валентностей АТРИБУТ- и ОТНОШЕНИЕ-объектов. Избыточность валентностей у объектов – плата за стандартизацию основных операций алгебры схем [17].

Представление динамических аспектов

Очерченная выше Схема схем не содержит явных средств представления динамических аспектов конструируемых на ее основе онтологий. Это кардинально отличает ее от господствующей парадигмы объектно-ориентированного анализа, согласно которой в концептуальной модели ПрО описывается жизненный объект каждого класса, в результате чего каждый объект любой соответствующей Д-модели является конечным автоматом [15]. Наш подход опирается на возможность независимого описания динамической структуры ПрО в обособленных концептуальных схемах сосуществующих с другими системами взглядов на актуальную ПрО [5, 6]. Подобные онтологии отражают цели исследования (например, диагноз, имитация, планирование), т.е. имеют проблемно- или методо-ориентированный, инструментальный характер. Синтетическую картину взаимодействия статических и динамических структур моделируемой системы позволяют

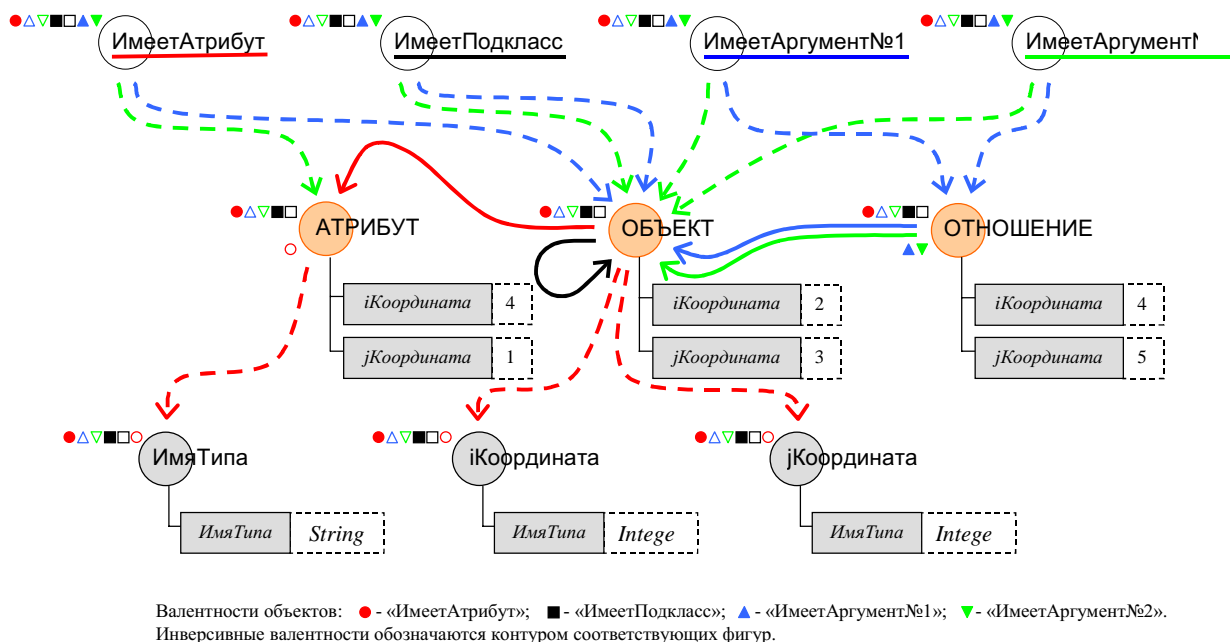


Рис. 3. Денотативная модель Схемы схем

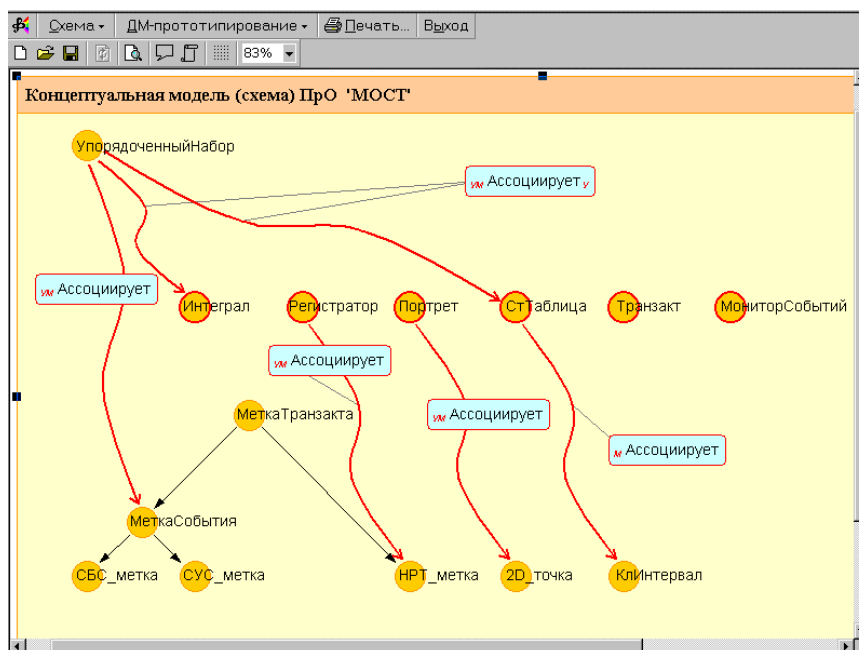


Рис. 4. ER-диаграмма концептуальной схемы систем с дискретными событиями; прямые стрелки изображают отношение наследования

воспроизвести различные механизмы интеграции непротиворечивых концептуальных моделей: импорт и наследование, композиция, управление контекстом моделирования при одновременном использовании в вычислительном эксперименте нескольких различных онтологий и наборов соответствующих им Д-моделей [6].

Преимущества такого подхода заключаются в возможности создания спектра эффективных специализированных инструментальных онтологий и их широкого повторного использования. При этом конструирование подобных онтологий по-прежнему осуществляется на единой основе – Схеме схем. В качестве примера методо-ориентированной онтологии на рис.4 приведена ER-диаграмма “Моделирование Событий и Транзактов” - МОСТ [18], описывающая популярную в задачах имитационного моделирования концептуальную схему систем с дискретными событиями, включая все принципиальные типы статистических элементов в таких моделях. Атрибуты указанных классов объектов (как структуры хранения, так и методы) вполне традиционны и неоднократно описаны в литературе (см., например, [19, 20]).

Заключение

В статье рассмотрен конструктивный в программно-техническом смысле подход к формированию онтологий в задачах модели-

рования сложных систем. Он включает решение вопроса об онтологической относительности, следует популярным идеям формальной спецификации программ и допускает эффективную реализацию в рамках базовых концепций программирования.

Предложен и описан базовый уровень представления и обработки данных для системного моделирования, опирающийся на теоретико-графовую парадигму.

Проанализирована рекурсивная онтология “Схема схем” для объектно-ориентированного представления знаний, которая способна разорвать бесконечномерную онтологическую цепочку. Схема схем разработана и используется для конструирования концептуальных моделей в общецелевой системе объектно-ориентированного моделирования *gB* [5, 6] (к примеру, рис.2 и 4 – скриншоты работы Мастера схем *gB*-системы).

Обсуждена проблема представления динамических аспектов моделируемых систем, которую предложено решать на основе создания специализированных онтологий и разработанных методов и средств разделения/распределения и повторного использования знаний, предстающих в форме эпистемологических единиц различного типа и назначения.

¹ В работе [17] в рамках формального описания концептуальной схемы ПрО главное внимание уде-

лено спецификации одной из важнейших операций алгебры схем - композиции концептуальных схем, что, в частности, связано с решением задачи таксономического вывода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виттих В.А.* Интеграция знаний при исследованиях сложных систем на основе инженерных теорий // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. № 5.
2. *Uschold M., King M., Moralee S., Zorgos Y.* The Enterprise Ontology // The Knowledge Engineering Review. 1998. V.13. №1.
3. *Девятков В.В.* Онтологии и проектирование систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2000. № 1.
4. *Виттих В.А.* Проблемы и принципы построения теории управления сложными системами // Известия Самарского научного центра РАН. 2000. №1.
5. *Смирнов С.В.* Онтологии в задачах моделирования сложных систем // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Самара: СНЦ РАН, 2000.
6. *Смирнов С.В.* Среда моделирования для построения инженерных теорий // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. № 2.
7. *Weinert F.* Theories, Models and Constraints / / Studies in History and Philosophy of Science. 1999. V. 30. № 2.
8. Современная западная философия: Словарь // Сост.: *В.С. Малахов, В.П. Филатов.* М.: Политиздат, 1991.
9. *Замулин А.В.* Структурированные алгебраические спецификации // Системная информатика: / Вып.5: Архитектурные, формальные и программные модели. Новосибирск: Наука, 1997.
10. Технология системного моделирования / *Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов и др.* М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988.
11. *Фути К., Судзуки Н.* Языки программирования и схемотехника СБИС. М.: Мир, 1988.
12. Математическая логика в программировании. М.: Мир, 1991.
13. *Gruber T.R.* A translation approach to portable ontologies // Knowledge Acquisition. 1993. V. 5. № 2.
14. *Dilger W.* Object-oriented Knowledge Representation – an Overview // J. New Generation Computation Systems. 1989. V. 2. № 4.
15. *Шлеер С., Меллор С.* Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях. Киев: Диалектика, 1993.
16. *Кораблин М.А., Смирнов С.В.* Наследование свойств в задачах объектно-ориентированного программирования на языке Модула-2 // Программирование. 1990. №4.
17. *Виноградов И.Д., Смирнов С.В.* Композиция концептуальных схем сложных систем // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Самара: СНЦ РАН, 1999.
18. *Смирнов С.В.* Объектно-ориентированная система дискретного моделирования МОСТ // Перспективы развития и применения средств вычислительной техники для моделирования и автоматизированного исследования. М.: ВНТО РЭС, 1991.
19. *Кораблин М.А., Смирнов С.В.* Монитор для имитационного моделирования систем с дискретными событиями. Куйбышев: КуАИ, 1980.
20. *Шрайбер Т.Дж.* Программирование на GPSS. М.: Машиностроение, 1980.

A ONTOLOGICAL RELATIVITY AND THE SIMULATION TECHNOLOGY OF COMPLEX SYSTEMS

© 2000 S.V. Smirnov

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara

The thesis «a ontological relativity» in a context of research of interrelations epistemological units of a domain-oriented modeling environment is discussed. The reception, natural in technological system, of a reduction of set of epistemological units is offered: to design the recursion conceptual frameworks. Appropriate «the framework of frameworks» is described and its use are considered.

УДК 681.513

АНАЛИЗ И СТРУКТУРИЗАЦИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ, ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

© 2000 Н.В. Дилигенский

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Анализируются фундаментальные характеристики и закономерности управления сложными системами различной природы – неживой, живой, общественной. Рассматриваются вопросы структуризации классов сложных систем, исходя из общесистемных свойств и закономерностей.

Проблеме исследования и анализа базовых свойств управления сложными системами, выявления и изучения фундаментальных, общесистемных закономерностей управляемых процессов посвящено значительное количество работ. Эта проблема рассматривалась и продолжает рассматриваться с самых различных точек зрения на разных уровнях исследования.

Исследование проблемы на высшем *философско-методологическом уровне* [1-5] путем содержательной интерпретации основных законов диалектики – перехода количества в качество, единства и борьбы противоположностей, отрицания отрицания – выявляет наиболее общие фундаментальные закономерности управления: сложность, структурность, цикличность.

Построение *онтологии* проблемы приводит к формулировке базовых общесистемных свойств управления сложными системами в виде следующих концептуальных положений: управляемости систем; структурного строения; иерархичности организации; гармоничности взаимодействия; эволюционного развития.

Разработка *гносеологии* управления сложными системами выделяет в качестве важнейших следующие проблемы: построение системы теоретического знания об управлении сложными объектами, определение базовых характеристик сложных систем и источников знания, выявление фундаментальных закономерностей управления сложными системами, создание методов и средств исследования систем, определение истинности знания и критериев истины.

Использование фундаментальных принципов диалектической логики и теории познания выявляет *базовые категории*, применяемые для описания существа проблемы управления сложными системами: сущность и явление, необходимость и случайность, возможность и действительность, цель и средство, причина и следствие, целое и частное, простое и сложное, качество и количество, единичное и всеобщее.

Совокупность фундаментальных закономерностей, общесистемных свойств и базовых категорий образует развивающуюся *систему метанаучного знания* [1]. Она формирует единую методологию изучения и исследования проблем управления сложными системами любой природы – неживой, живой, общественной – и включает в себя в качестве отдельных структур все результаты, полученные на других познавательных уровнях – общетеоретическом и специально-научном.

На уровне общетеоретического знания в рамках *общей теории систем* и ряда смежных общенаучных дисциплин – теории организаций, исследования операций, синергетики [6-9], выявлено и всесторонне изучено значительное число общесистемных свойств и характеристик управления сложными системами: целостность, сохраняемость, инвариантность, согласованность, гибкость, самоорганизация, эквивалентность, итеративность, интерактивность, разнообразие, прогнозируемость, синкретизм, коэволюция, цефализация.

В рамках общенаучного направления исследования *глобальных проблем мира* и путей их решения, основанного трудами Дж.

Форрестера и Римского клуба, выявлены следующие общесистемные закономерности управления сверхсложными системами: эмерджентность, саморазвитие, резидентность, антиинтуитивность, катастрофичность, направленность развития, безопасность, прогнозируемость, эволюционизм, противоречивость, интеллектуальность [10-13]. Закономерности были установлены при системном рассмотрении на транснациональных, региональных и национальных уровнях политических, социальных, демографических, культурных, экономических, финансовых, экологических, географических, климатических, производственных, промышленных, сельскохозяйственных, технологических, образовательных, научно-технических проблем.

Громадное число общесистемных свойств и закономерностей на уровне специального знания получено в разнообразных отраслях и сферах деятельности, при анализе сущности и эффективности управления различными системами.

Базовые свойства управлений и систем управлений установлены и всесторонне исследованы в рамках общей теории управления.

Классическая теория управления выявила в качестве базовых следующие фундаментальные характеристики и свойства систем управления: целевую ориентацию, структурность, замыкание, стабилизацию, качество, динамичность, точность, устойчивость, неопределенность, измеримость, грубость, чувствительность, адаптацию, колебательность, нелинейность, оптимальность, саморегулирование, дискретность [14-16].

Современная теория управления, начиная с трудов Р. Калмана, Р. Белмана, Л. Заде, М. Месаровича [6, 17, 18] в качестве фундаментальных характеристик систем управления ввела и исследовала следующие базовые понятия: управляемость, наблюдаемость, идентифицируемость, достижимость, многомерность, многосвязность, вырожденность, декомпозируемость, агрегируемость, инвариантность, типичность, иерархичность, робастность.

В цикле работ И.В. Прангишвили [3-5] сформулированы и исследованы следующие общесистемные закономерности управления

сложными системами различной природы: энтропийность, конвергенция, переоценка ценностей, колебательность, цикличность, конфликтность, ритмичность, антагонистичность.

В трудах А.Г. Бутковского и его сотрудников, посвященных созданию единой геометрической теории управления и выявлению базовых инвариантов управления [15, 19], изучены фундаментальные свойства и характеристики управлений: компенсация, калибровка, дополнительность, симметрия, относительность, отличимость, конечность, расслоение, связность.

Фундаментальные результаты общесистемного характера получены в *классической и современной физике* при изучении сложных физических систем. На уровне общетеоретического знания сформулированы следующие фундаментальные свойства систем: единство картины мира, движения, сохранения, дополнительности, простоты, наблюдаемости.

На уровне специального знания в сложных физических системах установлены следующие закономерности, имеющие общесистемный характер: турбулентность, хаотичность, самосогласованность, сингулярность, спонтанность, критичность, альтернативность, исключения, рождаемость, гибель, совместимость, равновесность, квантованность, диссипативность [8, 20, 21].

При исследовании *термодинамических систем* сформулированы и исследованы следующие общесистемные характеристики: открытость, энтропийность, адиабатичность, политропность, неравновесность, необратимость, статистичность, неоднородность, неизотропность [7, 22, 23].

В *химических и биохимических* системах выявлены и рассмотрены фундаментальные явления и закономерности: гомеостазис, регенерация, морфогенез, транскрипция, комплементарность, элонгация, диссипативность, резонансность, колебательность, упорядоченность и разметка [8, 20, 24].

Установлены и изучены базовые свойства *экономических систем*: целенаправленность, равновесие, сбалансированность, прогнозируемость, саморегулирование, адаптивность, устойчивое развитие, диагностируемость,

реструктуризация, фокусировка, неопределенность, цикличность, эффективность, экзогенность, эндогенность, иерархичность [4, 25, 26].

В социальных системах выявлены базовые свойства: разнородность, плюрализм, адаптивность, специализация, скоординированность, сбалансированность, преемственность, эволюционизм, безопасность, самоорганизация, конкурентность [9, 27, 28].

В поведении исторических процессов установлены следующие закономерности: усложненность, перестройки, альтернативность, неустойчивость, упорядоченность, хаотичность, катастрофичность, уникальность, предсказуемость, пассионарность, сценарность, мягкость, жесткость [29-31].

Методология выявления общесистемных закономерностей на основе адекватного описания и анализа свойств систем разработана во многих разделах классической и современной математики. Фундаментальными принципами построения математических моделей исследуемых систем являются: простота, наблюдаемость, соответствие, преобразование, симметрия, аксиоматическое построение теорий.

В классическом математическом анализе глубоко изучены следующие понятия, описывающие базовые характеристики систем: линейность, устойчивость, однородность, аддитивность, непрерывность, дискретность, измеримость, мультипликативность, оптимальность, корректность [32-34].

Значительное число фундаментальных свойств и закономерностей систем выявлено в качественной теории уравнений – направлении, основанном трудами А. Пуанкаре: особенности, аттракторы, бифуркации, катастрофы, вырождения, делимость переменных, мягкость, жесткость, сшивка, грубость, скольжение, гибель, рождаемость [34-36].

Функциональный анализ дал обоснования формирования общесистемных понятий: фундаментальности, эквивалентности, уравновешенности, измеримости, полноты, компактности, мощности, локальности, инвариантности, замкнутости, открытости, подчиненности [6, 37, 38].

Топологические методы обосновали об-

щесистемные характеристики сложных систем: гомеоморфизм, упорядоченность, классификацию, разбиение, объемность, мощность, регулярность, дистрибутивность, расширение [16, 39, 40].

При наличии огромного числа различных общесистемных понятий, полученных на разных уровнях в различных отраслях знаний, актуальной является проблема осмысления всей этой совокупности базовых свойств с позиций управления сложными системами и выработка единого концептуального подхода к структуризации фундаментальных характеристик и закономерностей управления в соответствии со степенью сложности сложных систем.

Общесистемные закономерности и характеристики управления сложными системами, полученные на метанаучном, междисциплинарном и специальном уровнях знаний, образуют систему единого знания, которая, в свою очередь, является сложной динамической, развивающейся системой, и ей, следовательно, присущи все фундаментальные свойства, сформулированные выше.

Рассмотрим возможные пути использования приведенных выше общесистемных характеристик для структуризации системы знаний об управлении сложными системами.

В качестве базовых структур, агрегирующих общесистемные свойства управлений, выделим три класса сложных систем: классические (“обычные”), сложные и сверхсложные (глобальные) системы. Границы между этими классами систем не будем полагать жестко определенными, и они могут характеризоваться некоторым интервалом или нечетко заданной областью перехода одного класса в другой. Изучим возможные способы отнесения систем к каждому из этих классов на основе формирования различных признаков классификации из базовых общесистемных свойств и закономерностей управления.

Исходя из фундаментальной характеристики природы систем, классическими будем считать системы неживой природы. Это физические, энергетические, материальные, производственные, технические и технологические системы.

К сложным отнесем системы живой

природы. Это биологические, экологические, социальные, экономические, производственные, образовательные системы, когда можно вычленив базовую, определяющую форму организации систем.

Сверхсложными будем полагать системы, в которых определяющим фактором является интеллектуальная деятельность. Таки ми системами являются:

- ноосфера – Мир Разума – планетарное понятие, введенное В.Н. Вернадским в качестве характеристики окружающей Природы, находящейся под влиянием человека и преобразуемой им [27, 41, 42];

- мир в целом и локальные социальные системы в неравновесном состоянии, когда необходимо учитывать взаимосвязь, взаимовлияние и взаимопроникновение всех процессов: общественных, политических, правовых, культурных, социальных, экономических, демографических, климатических, экологических, управленческих, организационных, технических, [10, 11, 28].

Рассматривая в качестве базовой характеристики *размерность*, структуризацию системы осуществим следующим образом.

Классическими будем считать системы, размерность которых характеризуется малыми и средними числами по классификации А.Н.Колмагорова [7]. Предельным случаем простейшей по этому показателю является однородная моносистема, характеризующаяся интегральными значениями базовых переменных состояния.

Системы, размерность которых описывается большими числами, будем относить к сложным системам. При увеличении размерности систем сложность их исследования резко возрастает (для большого класса систем в экспоненциальной зависимости от показателя размерности), что явилось основанием для Р. Калмана охарактеризовать проблему исследования систем высокой размерности как “проклятие размерности” [7].

Системы, размерность которых характеризуется сверхбольшими числами, отнесем к ультрасложным или глобальным системам. В сверхсложных системах все переменные состояния, управляющие и возмущающие воздействия неразрывным образом взаимосвя-

заны между собой, и поведение таких систем можно рассматривать только в нерасчлененной целостности их функционирования [1, 2, 12].

Под размерностью будем понимать некоторый средневзвешенный показатель, характеризующий количество степеней свободы систем (размерность соответствующего фазового пространства), число переменных состояния, управляющих и возмущающих воздействий.

Исходя из фундаментального свойства *открытости*, характеризующего интенсивность обмена исследуемой системы базовыми ресурсами – энергией и информацией – с окружающей средой, системы с малой степенью открытости отнесем к классическим системам. В предельном случае нулевой открытости это абсолютно закрытые, адиабатические системы. В таких классических практически закрытых системах в соответствии с вторым законом термодинамики постоянно происходят возрастание энтропии и убывание негентропии – отрицательной информации, - неизменно приводящие к росту беспорядка, неорганизованности и, в конечном счете, к деградации систем [4, 5, 22].

К глобальным отнесем системы другой предельной ситуации - абсолютно открытые системы, - максимальная степень открытости которых, вообще говоря, является разной для сверхсложных систем различной природы и организаций [4, 5]. В глобальных системах базовой закономерностью является постоянное убывание энтропии и возрастание негентропии, когда вся поступающая в систему извне энергия и информация наилучшим образом используется на цели совершенствования порядка и организации самой системы [4, 5, 23].

Системы с конечной степенью открытости отнесем к сложным системам. В этих системах одновременно протекают процессы возрастания и убывания энтропии и убывания и возрастания негентропии. Взаимодействие этих двух противоположных тенденций определяет в конкретных ситуациях различные многообразия нетривиальных сценариев поведения и развития сложных систем [4, 5].

Рассматривая в качестве базовой харак-

теристики *нелинейность*, структуризацию систем проведем следующим образом.

К классическим отнесем линейные системы, являющиеся однородными и аддитивными, и системы со слабой нелинейностью, допускающие линеаризацию. В них протекают однозначные процессы и приближенно выполняется принцип суперпозиции.

Сложными будем называть системы, поведение которых в компакте отвечает наличию существенных нелинейностей. В таких системах невозможна линеаризация, и локально протекание процессов принципиально отличается от поведения линейных систем. Нарушается единственность решений, структура систем существенно изменяется, решения могут возникать и пропадать [35, 36].

Сверхсложными будем называть системы, в которых существенная нелинейность проявляется глобально во всей области пространства состояний.

Исходя из общесистемной закономерности *регулярности*, системы, характеризующиеся гладким, однозначным развитием процессов во времени или небольшими локальными отклонениями (флуктуациями) от регулярных, среднеинтегральных значений, отнесем к классическим.

В таких системах протекают детерминированные процессы и процессы со слабой степенью стохастичности. Это имеет место, когда интенсивность как внутренних, так и внешних возмущений мала. Предсказуемость и прогнозируемость поведения классических систем во времени являются наилучшими. С течением времени детерминированные динамические траектории поведения таких систем выходят либо на стационарный режим, либо трансформируются в режим гармонических периодических колебаний [32, 36].

К сложным отнесем системы, в которых существенным фактором является наличие значительных внутренних и внешних возмущений, приводящих к протеканию процессов с высокой степенью стохастичности. Такими являются нестационарные, случайные процессы с большими значениями дисперсий отклонений, турбулентные режимы, возникающие в системах с высокой интенсивностью процессов переноса, нерегулярные последо-

вательности колебаний различной частоты, отвечающие наличию бифуркаций у систем. Временная корреляция развития событий во времени носит статистический характер. Соответствующие корреляционные и автокорреляционные функции имеют малую постоянную времени [44-46].

Сверхсложными будем считать системы, характеризующиеся корреляционными зависимостями с сверхмалыми постоянными времени. Предельное протекание процессов в таких системах отвечает ситуации хаоса, когда сколь угодно близкие во времени состояния становятся независимыми друг от друга. При этом хаос является динамическим, изменяющимся и развивающимся в соответствии с определенными базовыми закономерностями, определяемыми свойствами глобальных систем. Поведение систем в фазовом пространстве показателей хаотичности временных траекторий характеризуется образованием вполне определенных нетривиальных структур, отвечающих сверхсложной упорядоченности динамического хаоса [7, 8, 47].

Рассматривая в качестве фундаментального свойства *самоорганизацию*, структуризацию систем осуществим следующим образом.

К классическим отнесем системы, обладающие свойством саморегулирования процессов. Такими будем считать системы с периодическими аттракторами. В этих системах аттракторами являются имеющие стабильную конфигурацию в пространстве состояний замкнутые фазовые траектории, состоящие из множества предельных точек, к каждой из которых асимптотически стремится не менее одной интегральной кривой. В классических системах образуются автоколебательные процессы - детерминированные периодические режимы с характеристиками, определяемыми внутренними свойствами самих систем. В фазовом пространстве автоколебания отвечают перемещению изображающей точки по периодическим аттракторам. Автоколебательные режимы являются следствием адаптации характеристик нелинейных систем на воздействия внешней среды [15, 35, 36].

К сложным системам отнесем системы с самоорганизацией статистических характеристик своего поведения. Такими будем счи-

тать системы со странными аттракторами. Странными аттракторами являются неупорядоченные чередования обычных периодических аттракторов, хаотическим образом перемещающихся в фазовом пространстве. Процессы в системах со странными, хаотическими аттракторами отвечают детерминированным решениям, которые ведут себя как случайные зависимости. Движение по странным аттракторам отвечает существованию сложных непериодических колебаний, параметры которых чрезвычайно чувствительны к начальным данным и значениям параметров. Характер реакции систем на возмущения неоднозначен, теряется определенность и прогнозируемость поведения. При этом статистически усредненные характеристики хаотичных траекторий являются упорядоченными и образуют в фазовом пространстве детерминированные клубки траекторий. Такие странные детерминированные хаотические режимы возникают, когда увеличивается интенсивность внешних воздействий на систему [5, 11].

К суперсложным системам отнесем системы, обладающие свойством саморазвития. Такими будем считать системы с аттракторами, представляющими собой фракталы. Фракталы отвечают описанию областей на основе бесконечно продолжающегося самоподобия. Глобальные системы характеризуются наличием детерминированного хаоса, и множества сколь угодно близких траекторий экспоненциально разбегаются во времени. Поведение таких решений описывается на основе показателей Ляпунова, характеризующих странность странных траекторий и представляющих меру хаотичности детерминированных процессов. В фазовом пространстве показателей Ляпунова фазовые портреты суперсложных систем представляют собой нетривиальные карты хаоса и упорядоченности в виде разнообразных фрактальных структур (типа “медуз”, “ласточек”, “Зиркон-Зити” и других) [8, 36, 48, 49].

Исходя из общесистемного свойства управления *замыкания*, классическими будем считать системы, в которых определяющей в процессах управления является отрицательная обратная связь. При этом основной зада-

чей является стабилизация динамических процессов. Поведение таких систем является корректным, и при малых возмущениях управлений, помех и параметров изменения состояний систем также малы [14, 15].

Глобальными будем полагать системы, в которых базовой является положительная обратная связь. При этом главной закономерностью является перспективное, прогрессивное использование всей информации, поступающей в систему, для целей развития системы. Базовым процессом является устойчивое развитие систем, и соответствующие модели поведения систем являются некорректными [25].

Сложные системы характеризуются наличием как положительных, так и отрицательных обратных связей, и их поведение определяется многоплановым, динамическим взаимодействием этих противоположных механизмов [10].

Рассматривая в качестве базовой характеристики *особое поведение*, к классическим отнесем системы, в которых особенности проявляются локально в малом числе невырожденных изолированных особых точек. Такими будем считать системы, характеризующиеся наличием устойчивых, выделенных сепаратрисами конечных окрестностей фазовых пространств каждой из особых точек. Особыми точками таких систем являются морсовские точки, и в их окрестностях гладкой заменой переменных потенциальная функция может быть приведена к канонической форме морсовского седла. Типовыми фазовыми портретами в этом случае являются узлы, фокусы, седла и центры [14].

Сложными будем полагать системы, в которых происходит взаимодействие локальных типовых особенностей. Это системы с типовыми катастрофами Тома – устойчивыми многообразиями вырожденных особых точек. При типовых вырождениях особых точек происходят неустранимые катастрофы – резкие скачкообразные изменения поведения и перестройка структур систем при малых изменениях управляющих воздействий.

Типовыми катастрофами, к которым сводятся все виды поведения систем при гладких изменениях (шевелениях) переменных

состояния и управляющих параметров в случае однократного вырождения особенностей и одного и двух управляющих воздействий, являются особенности двух видов – складка и сборка Уитни [36, 51].

Складка определяет катастрофу, зависящую от одного управляющего параметра и происходящую при слиянии двух (устойчивой и неустойчивой) точек. При этом при некотором критическом значении управляющего воздействия происходит катастрофа – образование вырожденной неустойчивости особой точки седло – узел, и стационарное решение системы перестает существовать.

Сборка определяет катастрофу, зависящую от двух управляющих параметров, и отвечает слиянию либо двух, либо трех особых точек. Границы области существования катастрофы на плоскости управляющих параметров определяются двумя гладкими кривыми с точкой возврата (острием), выделяющими две зоны. В одной (меньшей) зоне состояние системы характеризуется тремя особыми точками. В другой (большей) зоне поведение системы определяется существованием единичной особой точки. Линии границы катастрофы отвечают слиянию двух особых точек и характеризуются двумя особыми точками системы, одна из которых является вырожденной. Эти линии определяют наличие катастроф типа складки.

В точке возврата линий границ происходит слияние трех особых точек и имеется одна, дважды вырожденная особая точка системы. Эта точка отвечает катастрофе сборки. В ней, в зависимости от путей подхода, происходит либо однократное, либо двукратное вырождение особенностей. Для таких двухпараметрических управляющих систем одной из центральных является проблема отыскания структур оптимальных стратегий управления, поскольку для любой пары начального и конечного состояний перевод системы может осуществляться либо гладким путем, либо через катастрофы [36, 51].

Более многообразными и сложными являются типовые катастрофы, зависящие от большего числа управляющих параметров и переменных состояния. При воздействии трех и четырех управляющих параметров осо-

бенностями являются каспоиды (семейства обыкновенных точек возврата), отвечающие однократному вырождению (катастрофы - ласточкин хвост, бабочка), и эллиптические, параболические и гиперболические конические омбилики (множества эллиптических точек равной нормальной кривизны), соответствующие двукратному вырождению (катастрофы - кошелек, пирамида и гриб). К этим типовым катастрофам сводятся все особенности систем с тремя и четырьмя управляющими параметрами при гладких шевелениях фазовых переменных и управлений [36, 51].

Границы областей катастроф для этих ситуаций являются достаточно сложными поверхностями и гиперповерхностями с особыми линиями перегибов, биперегибов, возврата, самопересечения и с особыми точками - седлами, клювами, каспами. Сечения границ этих катастроф дают большое число разнообразных структурных перестроек сложных систем – всевозможные каустики и бикаустики, губы, верблюды, блины, летающие блюдца, клювы [36, 51, 52].

К глобальным отнесем системы с более сложными катастрофами, не сводящимися к типовым. Это каспоиды и конические омбилики с числом управляющих параметров больше четырех, символические омбилики, а также высшие катастрофы с тремя и более вырожденными собственными значениями матрицы управляемости [36, 51], - когда многообразие особых поведений систем становится определяющим фактором.

Исходя из фундаментального свойства *устойчивости*, к классическим будем относить системы, в которых потеря устойчивости при малых возмущениях происходит плавным, мягким образом в небольшом числе точек. Это имеет место в типовых особых точках – узлах, фокусах и центрах [35]. В линеаризованных в окрестности особых точек системах такая мягкая потеря устойчивости отвечает переходу корней из левой полуплоскости комплексной области значений с отрицательной действительной частью в правую полуплоскость с положительной действительной частью корней.

Сложными будут являться системы, в которых при малых возмущениях происходит

жесткая (катастрофическая) потеря устойчивости в небольшом числе точек. Такая жесткая потеря устойчивости может происходить в точках, линиях, поверхностях и гиперповерхностях катастроф, типовые структуры которых были рассмотрены выше [36, 51].

К глобальным будем относить системы, в которых потеря устойчивости протекает жестким катастрофическим образом в большом числе точек гиперповерхностей катастроф (в том числе, мощности континуума). Такую потерю устойчивости будем называть глобальной или системной потерей устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Берг А.И., Бирюков Б.В.* Познание сложных систем и проблема нетранзитивности научного объяснения // Философско-методологические основания системных исследований. М.: Наука, 1983.
2. *Моисеев Н.Н.* Современный рационализм. М.: НГВП КОКС, 1995.
3. *Прангишвили И.В.* Основные системные законы управления сложными системами различной природы в кризисной ситуации // Приборы и системы управления. 1997. №2.
4. *Прангишвили И.В.* Системные закономерности функционирования сложных систем различной природы и проблем управления ими // Приборы и системы управления. 1998. №10.
5. *Прангишвили И.В.* Общесистемные закономерности при управлении сложными системами различной природы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Самара: СНЦ РАН, 1999.
6. *Заде Л., Дезоер Ч.* Теория линейных систем. М.: Наука, 1970.
7. *Пригожин Н., Стенгерс Н.* Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. М.: Наука, 1986.
8. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. М.: Наука, 1994.
9. *Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.* Синергетика и прогнозы будущего. М.: Наука, 1997.
10. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. М.: Наука, 1978.
11. *Mesarovic M., Pestel E.* Mankind at the turning point N.Y.E.P. Dutton. 1974.
12. *Гвишиани Д.М.* Методологические проблемы изучения глобальных процессов // Экономика и математические методы. 1979. Т.15. В.2.
13. *Клиг А., Шнейдер А.* Первая глобальная революция. М. 1992.
14. *Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г.* Методы теории автоматического управления. М.: Наука, 1971.
15. *Паллю де Ла Барьер Р.* Курс теории автоматического управления. М.: Машиностроение, 1973.
16. *Бутковский А.Г.* Кибернетика и структура // Проблемы управления и информатики. 1996. № 1-2.
17. *Калман Р.* Об общей теории систем управления // Труды 1 конгресса ИФАК, Т.2. М.: АН СССР, 1961.
18. *Калман Р., Фалб П., Арбит М.* Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971.
19. *Бутковский А.Г.* К геометрической теории управления системами с распределенными параметрами // Теория и системы управления. 1995. № 4.
20. *Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Самарский А.А., Малинецкий Г.Г.* Нестационарные структуры и диффузионный хаос. М.: Наука, 1992.
21. *Фракталы в физике.* М.: Мир, 1988.
22. *Гленсдорф П., Пригожин Н.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973.
23. *Николис Г., Пригожин Н.* Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979.
24. *Белинцев Б.Н.* Физические основы биологического формообразования. М.: Наука, 1991.
25. *Артур У.* Механизмы положительной обратной связи в экономике // В мире науки. 1990. № 4.
26. *Петров А.А.* Экономика. Модели. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1996.
27. *Моисеев Н.Н.* Экология глазами математика. М.: Молодая гвардия, 1988.
28. *Кларк У.К.* Управление планетой Земля // В мире науки. 1989. № 11.

29. Гумилев Л.Н. География этноса в исторический период. Л.: Наука, 1990.
30. Тойнби А.Дж. Постигание истории. М.: Прогресс, 1991.
31. Малинецкий Г.Г. Нелинейная динамика и историческая механика // Общественные науки и современность. 1997. № 2.
32. Шварц Л. Анализ. Т. I, II. М.: Мир, 1972.
33. Хартман Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Мир, 1970.
34. Моисеев Н.Н. Математика ставит эксперимент. М.: Наука, 1979.
35. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1976.
36. Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990.
37. Рисс Ф., Секефальви-Надь Б. Лекции по функциональному анализу. М.: Мир, 1979.
38. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1981.
39. Келли Дж. Общая топология. М.: Мир, 1981.
40. Сулливан Д. Геометрическая топология. М.: Мир, 1975.
41. Вернадский В.Н. Научная мысль как планетарное явление. М.: Наука, 1991.
42. Моисеев Н.Н. Человек и ноосфера. М.: Молодая гвардия, 1988.
43. Колмогоров А.Н. Автоматы и жизнь. Кибернетика ожидаемая и кибернетика неожиданный. М.: Наука, 1968.
44. Бакай А.С., Сигов Ю.С. Многоликая турбулентность. М.: Знание, 1988.
45. Кринский В.И., Медвинский А.Б., Панфилов А.В. Эволюция автоволновых вихрей. М.: Знание, 1986.
46. Ласло Э. Век бифуркации. Постигание меняющегося мира // Путь. 1995. № 7.
47. Малинецкий Г.Г. Хаос, структуры, вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1997.
48. Странные аттракторы. М.: Мир, 1981.
49. Седов Е.А. Взаимосвязь энергии, информации и энтропии в процессах управления и самоорганизации // Информация и управление. 1985.
50. Дьюдни А.К. Прыжок в пространстве Ляпунова // В мире науки. 1991. № 11.
51. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Кн.1. М.: Мир, 1984.
52. Арнольд В.И., Варченко А.Н., Гусейн-Заде С.М. Особенности дифференцируемых отображений. I Классификация критических точек, каустик и волновых фронтов. М.: Наука, 1982.

ANALYSIS AND STRUCTURATION OF FUNDAMENTAL QUALITIES, CHARACTERISTICS AND CONTROL PROBLEMS FOR COMHLEX SYSTEMS

© 2000 N.N. Diligensky

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara

The problems of complex systems formation on the basis of fundamental characteristics and control appropriateness (regularity, non-linearity, feedback, stability, specific behaviour, self-organization etc.) description are considered in the present article.

ПОЛУБЕСКОНЕЧНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

© 2000 Э.Я. Рапопорт

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Для параметризуемых задач управления в условиях ограниченной неопределенности предлагаются формальные модели полубесконечной оптимизации, допускающие простые пути обобщений на нечеткие модельные представления, используемые в теории интеллектуальных систем. Предлагается подход к поиску оптимальных решений, базирующийся на альтернативных свойствах искомым экстремалей. Приводятся примеры использования рассматриваемых моделей применительно к задачам управления динамическими системами с распределенными и сосредоточенными параметрами и параметрического синтеза H^∞ -оптимальных регуляторов.

Введение

Проблема управления объектами различной природы и назначения в условиях неопределенности исходной информации адекватно отражает большинство реальных ситуаций их функционирования и в силу этого является центральной в современной теории и технике построения эффективных управляющих систем, способных обеспечить в подобной обстановке требуемый уровень выходных показателей качества.

Именно концепция преодоления указанной неопределенности положена в основу как традиционных способов построения специальных систем управления (СУ) в рамках классического подхода, отличающегося применением строгих математических описаний моделируемых процессов [1-3], так и методологий создания, базирующихся на современных информационных технологиях многоуровневых интеллектуальных управляющих систем (ИС), на исполнительном уровне иерархии которых могут применяться формальные модели традиционной теории управления [4, 5].

Если в пределах «обычных» методов речь идет, главным образом, о точно формулируемых в терминах вполне определенных моделей задачах синтеза робастных или адаптивных систем [1], аналитического конструирования алгоритмов программного управления ансамблями траекторий и стратегии игрового позиционного управления [2, 3], то интел-

лектуальные системы в условиях неточных, размытых модельных представлений ориентированы, прежде всего, на обработку и использование знаний в соответствующей предметной области, в частности, путем применения логико-лингвистической аппроксимации характеристик объекта и продукционных правил логического вывода [4, 5].

В то же время (и не в последнюю очередь в связи с отсутствием устоявшейся общепринятой терминологии) точное разграничение отмеченных методов борьбы с неполнотой исходной информации вряд ли возможно, и пересечение множеств реализующих их стратегий управления оказывается непустым. Так, например, адаптивные системы в рамках определений, сформулированных в [4], могут быть отнесены к системам, «интеллектуальным в малом».

При этом решение задачи повышения качества функционирования сложной системы управления оказывается, как правило, неоднозначным: оно может быть получено как за счет выбора более сложных моделей СУ на исполнительном уровне с использованием наиболее простых интеллектуальных средств, так и, наоборот, за счет повышения степени интеллектуальности, компенсирующей недостатки простейших исполнительных моделей. Далеко не тривиальная проблема выбора надлежащего компромисса может быть решена в соответствии с FZUP - методологией проектирования многоуровневых

ИС, основанной на последовательном (возможно, многократном) применении процедур формирования (вычленения) моделей исполнительного уровня за счет выделения адекватных функций управления и согласования (координации) исполнительного и интеллектуального подуровней по результатам оценок имитационного моделирования [6].

Существующий опыт решения возникающего здесь комплекса взаимосвязанных задач «обыкновенного» и интеллектуального управления [6] объективно подтверждает плодотворность естественного в такой ситуации сочетания традиционных методов теории управления и аппарата теории искусственного интеллекта. В частности, при решении задач управления традиционными методами, наиболее целесообразным с указанной точки зрения является применение формальных моделей, в максимальной степени учитывающих реальные условия неопределенности исходной информации в виде, допускающем максимально простые пути перехода путем соответствующих обобщений к модельным представлениям, используемым в теории интеллектуальных систем. Некоторые из возможных формулировок подобных задач, отвечающие указанным требованиям, рассматриваются в настоящей работе.

1. Модели полубесконечной оптимизации

Неполнота априорной информации об управляемых процессах порождается, главным образом, неопределенностью характеристик объекта управления, внешних воздействий и целевых установок.

Адекватные реальности модели всегда содержат элементы неопределенности, отражающие заведомо неточные в силу своей приближенности представления о поведении объектов, причем уровень неопределенности возрастает вместе со сложностью объекта вплоть до возникновения вообще трудно формализуемых ситуаций. При этом получение детерминированных формальных моделей затрудняется как сложностью или отсутствием требуемых аналитических описаний в соответствующей предметной области, так и объективно существующими неопределенно-

стями, связанными со способами функционирования объекта и его взаимодействием с окружающей средой. Простейшими примерами «неустраняемых» неопределенностей могут служить непрогнозируемые заранее вариации начального состояния объекта и его определяющих параметров, часто характеризующие реальные процессы в системах управления.

Внешние возмущающие воздействия неопределенны по своей природе и их влияние сказывается, в основном, двояким образом: они могут рассматриваться в качестве неопределенных аддитивных составляющих, действующих по каналам управления, либо в роли факторов, порождающих параметрические (в более сложных случаях - структурные) неопределенности управляемого объекта. Если внешние воздействия реализуют стратегию противника при управлении в конфликтных ситуациях, то возникают специальные игровые задачи управления в условиях неопределенности [3].

Неопределенность целей возникает, главным образом, за счет многокритериальных постановок задач управления, вынужденного учета неточно заданных факторов при формулировке критериев оптимальности и неопределенностей, специально вводимых с использованием существующих допусков для создания условий разрешимости поставленной задачи простейшими средствами [7,8].

Многокритериальность преодолевается, обычно, путем применения различных способов свертки локальных критериев качества к скалярной форме [7]; неточно известные факторы, формирующие, в частности, размытые представления о целях процесса управления, образуют «неустраняемые» неопределенности, а неполнота информации, обуславливаемая используемыми схемами постановки задачи, чаще всего порождается существующими допусками на отклонение от требуемого в идеале конечного состояния управляемого объекта [8, 9].

Заметим, что переход здесь к соответствующей детерминированной задаче с фиксированным концом траектории может резко усложнить ее решение.

Особенно наглядно роль этого обстоя-

тельность видна применительно к управлению системами с распределенными параметрами, где в достаточно типичных ситуациях подобная постановка либо приводит к неразрешимости задачи ввиду неуправляемости объекта, либо к практически нереализуемым алгоритмам управления [10, 11].

Во многих случаях все указанные виды неопределенностей не могут быть охарактеризованы достоверными статистическими описаниями, и вся реально имеющаяся информация о неопределенных факторах исчерпывается сведениями о допустимых областях их возможного изменения.

В такой ситуации объективный учет неопределенностей возможен лишь путем рассмотрения в качестве объекта управления целого семейства объектов, образуемых всем множеством допустимых значений неточно заданных исходных характеристик. При подобном подходе даже достаточно простые формальные представления в целом ряде случаев с удовлетворительной точностью отображают множество возможных состояний достаточно сложных управляемых процессов.

Адекватным аппаратом исследования соответствующих моделей, описываемых в терминах функций максимума, становятся методы минимакса и теории игр [2, 3]. В эту схему, в частности, укладываются известная стратегия гарантированного результата [3, 7], задачи робастного управления ансамблями траекторий процессов, порождаемыми всеми допустимыми реализациями неопределенностей [1, 2, 8]; задачи с допусками на отклонение конечных состояний, оцениваемыми в равномерной метрике [8, 11, 12]. В характерных параметрических вариантах, когда известные условия оптимальности или исходные требования допускают предварительную параметризацию искомым управляющих воздействий, априори задаваемых подобным образом с точностью до некоторого конечномерного вектора параметров $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, n}; \Delta \in G_n \subset E^n$; рассматриваемые модельные задачи управления часто сводятся к специальным задачам математического программирования (ЗМП) [8, 12].

Пусть используемые модели управляе-

мых процессов позволяют получить в явной форме зависимости

$$F_{0p}(y^{(p)}, z, \Delta), p = \overline{1, q}, q \geq 1,$$

$$F_k(x^{(k)}, z, \Delta), k = \overline{1, q_1}, q_1 \geq 1,$$

для q нормированных локальных критериев оптимальности F_{0p} и q_1 рассматриваемых оценок F_k качественных показателей процесса, включая оценку конечного состояния объекта, от Δ , вектора $z \in V_s \subset E^s$ учитываемых неопределенных факторов, принимающих любые значения в пределах заданной области V_s , и некоторых распределенных на заданных множествах L_{r_p} и Ω_{m_k} параметров $y^{(p)} \in L_{r_p} \subset E^{r_p}, x^{(k)} \in \Omega_{m_k} \subset E^{m_k}$, смысловое содержание которых определяется конкретным содержанием задачи. Если допуски ε на величину оценок F_k определяются бесконечным числом неравенств

$$F_k(x^{(k)}, z, \Delta) \leq \varepsilon, x^{(k)} \in \Omega_{m_k}, z \in V_s, k = \overline{1, q_1} \quad (1)$$

для всех значений $x^{(k)}$ и z из Ω_{m_k} и V_s , то тогда поиск стратегии гарантированного результата в условиях ограниченной заданием множества $V_s \ni z$ неопределенности для достаточно широкого круга прикладных задач сводится к минимаксной ЗМП на экстремум функции конечного числа переменных $\Delta_i, i = \overline{1, n}$, с бесконечным числом ограничений (1), эквивалентных ограничению на соответствующую функцию максимума:

$$I^*(\Delta) = \max_{\left\{ \begin{array}{l} F_{0p}(y^{(p)}, z, \Delta) : y^{(p)} \in L_{r_p}, \\ z \in V_s, p = \overline{1, q} \end{array} \right\}} \rightarrow \min \Delta \in G_n, \quad (2)$$

$$\Phi^*(\Delta) = \max_{\left\{ \begin{array}{l} F_k(x^{(k)}, z, \Delta) : x^{(k)} \in \Omega_{m_k}, \\ z \in V_s, k = \overline{1, q_1} \end{array} \right\}} \leq \varepsilon, \quad (3)$$

причем ЗМП (2), (3) имеет решение только в том случае, когда допуск ε удовлетворяет неравенству

$$\varepsilon \geq \varepsilon_{\min}^{(n)} = \inf \left\{ \Phi^*(\Delta) : \Delta \in G_n \right\} \quad (4)$$

относительно минимакса $\varepsilon_{\min}^{(n)}$.

Подобные ЗМП получили название задач полубесконечной оптимизации (ЗПО) [13]. Задача (2) - (4) может быть сведена к виду базовой модели ЗПО

$$I(\Delta) = \max_{z \in V_s} \left\{ F_0(y, z, \Delta) : y \in L_r \subset E^r, \right\} \rightarrow \min, \Delta \in G_n; \quad (5)$$

$$\Phi(\Delta) = \max_{z \in V_s} \left\{ F(x, z, \Delta) : x \in \Omega_m \subset E^m, \right\} \leq \varepsilon, \quad (6)$$

$$\varepsilon \geq \varepsilon_{\min}^{(n)} = \inf \{ \Phi(\Delta) : \Delta \in G_n \},$$

представляющей собой скалярный аналог (2) - (4) [12].

Во многих частных случаях ЗПО непосредственно формулируются в скалярной форме (5), (6) [12].

Распространение подобных постановок на более широкий класс целевых функций и функциональных ограничений приводит к ЗПО более сложного вида. В частности, замена функций максимума $I(\Delta)$ и $\Phi(\Delta)$ на функции, задаваемые последовательностью чередующихся операций взятия максимума и минимума, приводит к обобщению ЗПО (5), (6) в виде задачи на кратный минимакс [14]. Если множество L_r в (5) зависит от Δ , то схема (5), (6) образует ЗПО со связанными переменными [14], где $L_r(\Delta)$ задается определенным образом, например, как множество оптимальных решений некоторой параметрической экстремальной задачи. В рамках формулируемой в последнем варианте ЗПО с экстремальными ограничениями [15] укладывается ряд задач обратной оптимизации, теории игр, теории активных и иерархических систем управления и др. [15].

Особо отметим, что рассматриваемые формальные модельные представления с равноправными реализациями неопределенностей на заданных допустимых множествах легко распространяются на широко используемые в теории интеллектуальных систем нечеткие модели, методы построения которых базируются на принципах теории нечетких множеств и нечеткой логики [5, 6, 16-18].

Если возможные реализации неопреде-

ленных факторов считаются неравноправными и дополнительно характеризуются соответствующими функциями принадлежности, то множества их допустимых значений можно считать нечеткими и использовать методы обработки нечеткой информации применительно к полученному таким образом «расширенному» описанию объекта. На этом пути могут быть получены естественные обобщения традиционных методов теории управления и оптимизации. В частности, вместо детерминированной задачи одновременного управления всем семейством «равноправных» объектов осуществляется переход к задаче управления нечетким пучком траекторий динамической системы, определяемым решением соответствующего нечеткого дифференциального включения, которое образуется нечетким множеством допустимых неопределенных факторов, с последующим распространением на такую задачу результатов теории оптимального управления детерминированными системами [16]. Широко применяемые на практике варианты постановок параметризованных задач оптимизации и управления в нечетких условиях, в том числе, управления дискретными динамическими системами, оптимального планирования и координации управления производством и т.п., во многих ситуациях отличаются от ЗПО (5), (6) лишь расширением определения z как элемента нечеткого множества V_s .

По существу ЗПО (5), (6) уже можно рассматривать как задачу робастного программирования [19]. Если при этом вместо F_0 и F в (5), (6) рассматриваются нечеткие расширения этих функций, то такие ЗПО естественным образом трансформируются в соответствующие задачи нечеткого математического программирования (ЗНМП) [16, 18, 19], разрешаемые специальными методами, в частности, путем «обратного» представления такой ЗНМП в виде семейства задач типа (5), (6) полубесконечной оптимизации целевой функции на α -уровневых подмножествах нечетких множеств [16, 18, 19].

Сказанное выше объективно свидетельствует о целесообразности использования моделей полубесконечной оптимизации для

формального описания в условиях ограниченной неопределенности параметризуемых задач управления, широкий круг которых укладывается в достаточно представительную схему (5), (6) или различных ее модификаций [12, 13, 20].

Разработка методов решения ЗПО (5), (6) представляет собой достаточно сложную проблему. Применение численных методов недифференцируемой оптимизации [13, 21] связано с известными затруднениями и не позволяет установить общие закономерности, характеризующие искомые экстремали. В работах [12, 22, 23] предложен другой возможный подход («альтернативный метод»), базирующийся на чебышевских свойствах решений ЗПО и априорной информации о характеристиках оптимизируемых и ограничиваемых функций, диктуемой знаниями предметной области, к которой относится решаемая задача.

При выполнении некоторых (обычно малостепенных для прикладных задач) допущений на решениях $\Delta = \Delta^0$ ЗПО суммарное число равных друг другу максимумов функций $F_0(y, z, \Delta^0)$ и $F(x, z, \Delta^0)$, формирующих критерий оптимальности $I(\Delta^0)$ в (5) и верхнюю грань $\Phi(\Delta^0)$ функциональных ограничений в (6), оказывается равным числу оптимизируемых параметров. Этот факт («альтернативные свойства»), установленный в [12, 22, 23], порождает замкнутую относительно всех искомым неизвестных систему соотношений в точках максимума $F_0(y, z, \Delta^0)$ и $F(x, z, \Delta^0)$, где значения этих функций оказываются равными $I(\Delta^0)$ и заданному пределу ϵ для $\Phi(\Delta^0)$.

При известном характере распределения $F_0(y, z, \Delta^0)$ и $F(x, z, \Delta^0)$ соответственно на $L_r \times V_s$ и $\Omega_m \times V_s$, позволяющем идентифицировать точки максимума, данные соотношения редуцируются к системам уравнений, последующее решение которых исчерпывает решение ЗПО.

Целесообразность такого подхода к ре-

шению многих прикладных ЗПО подтверждается результатами, полученными при исследовании возможностей альтернативного метода применительно к целому ряду конкретных задач оптимизации, представляющих самостоятельный интерес [8, 11, 12, 20, 24].

Как свидетельствуют приводимые ниже примеры, в рассматриваемую схему ЗПО укладывается достаточно широкий круг параметризуемых задач управления в условиях ограниченной неопределенности.

2. Управление динамическими системами с распределенными (СРП) и сосредоточенными (ССП) параметрами

В большинстве ситуаций, представляющих практический интерес, алгоритмы программного оптимального управления СРП в типичных детерминированных задачах с фиксированным концом траектории в соответствующем бесконечномерном фазовом пространстве состояний [10] могут быть найдены лишь с определенной (часто недопустимо большой) погрешностью по достижению требуемой конечной точки. Подобное положение объясняется либо потерей управляемости объекта как раз относительно наиболее характерных требуемых конечных состояний, либо отсутствием и нереализуемостью точных решений соответствующей задачи, определяемых бесконечномерным вектором искомым параметров для оптимальных управляющих воздействий [10, 11, 24].

Переход к задачам с подвижным концом траектории в пределах достижимой области фазового пространства, образуемой практически всегда существующими допусками $\epsilon\epsilon$ на отклонения от требуемой в идеале конечной точки, т.е. постановка задачи в условиях ограниченной неопределенности целевых установок, кардинально изменяет ситуацию, обеспечивая возможность получения точных реализуемых решений [8, 11, 12, 24].

Целый ряд характерных краевых задач оптимального управления СРП формулируется подобным образом в условиях оценки $\epsilon\epsilon$ в равномерной метрике, т.е. при заданной точности $\epsilon\epsilon$ равномерного приближения конечного состояния системы к требуемому на заданной области Ω_m изменения простран-

ственных координат $x \in \Omega_m$ для всего ансамбля траекторий системы, т.е. для всех допустимых реализаций $z \in V_s$ неопределенных факторов. Если искомые управляющие воздействия представимы вектором Δ конечного числа параметров, и могут быть получены (с помощью используемых формальных моделей) явные зависимости критерия оптимальности $I(\Delta)$ и результирующего состояния СРП $F^*(x, z, \Delta)$ от своих аргументов, то такие задачи часто сводятся к ЗПО типа (5), (6).

Здесь при $F(x, z, \Delta) = |F^*(x, z, \Delta)|$ в качестве ограничения (6) фигурируют заданные условия для допустимых конечных состояний СРП, а в роли минимизируемого функционала $I(\Delta)$ достаточно общего вида рассматривается оценка (5) (в частности, также в равномерной метрике) некоторой, характеризующей учитываемые качественные показатели системы, функции $F_0(y, z, \Delta)$, вообще говоря, определенной на заданной пространственной области $L_r \ni y$. В частных случаях F_0 не зависит от y или от y и z , и тогда в последнем варианте $F_0(y, z, \Delta) \equiv F_0^*(\Delta) = I(\Delta)$, а для детерминированных задач управления имеем $(y, z) = y$; $(x, z) = x$ в (5), (6).

Альтернативный метод решения подобных ЗПО успешно апробирован применительно к ряду задач оптимизации процессов технологической теплофизики [8, 11, 12, 24].

В роли $F^*(x, z, \Delta)$ здесь могут рассматриваться отклонения пространственных распределений управляемых температурных полей от заданных состояний в конце оптимального процесса; в качестве неопределенных факторов z - интервальные характеристики параметров используемых моделей СРП (например, начальные температуры и уровень тепловых потерь), а выражения для $I(\Delta)$ определяются конкретным содержанием выбираемых критериев оптимизации. В частности, $F_0(y, z, \Delta)$ может определяться аналогично $F(x, z, \Delta)$ для оптимизируемого в

равномерной метрике отклонения результирующего состояния полей концентрации диффундирующего агента от требуемого в пределах поверхностного слоя $L_r \ni y$ при управлении термодиффузионными процессами,

либо $F_0(y, z, \Delta) \equiv \sum_{i=1}^n \Delta_i = I(\Delta)$ в задачах быстрой реакции, если в роли искомых параметров Δ_i фигурируют длительности отдельных интервалов оптимального процесса.

Частный случай $(y, z) = z$, $(x, z) = z$ в (5), (6) приводит аналогичным СРП образом к минимаксной задаче гарантированного управления ансамблями траекторий динамической ССП [8].

3. Параметрический синтез H^∞ -оптимальных систем автоматического управления

Многие задачи параметрического синтеза линейных многомерных систем автоматического управления в условиях ограниченной неопределенности могут быть сведены к соответствующим ЗПО, формулируемым в терминах H^∞ -норм $\|\cdot\|_\infty$ частотных характеристик системы [25].

Пусть $\Delta \in G_n$ - вектор искомых параметров регулирующих устройств, определяемый на параметрически заданном множестве $G_n \subset E^n$ стабилизирующих регуляторов фиксированной структуры.

В целом ряде конкретных ситуаций в качестве критерия оптимизации $I(\Delta)$, характеризующего реакцию системы на внешние возмущения с ограниченной дисперсией в условиях неполной информации о частотном спектре воздействий, целесообразно рассматривать H^∞ -норму передаточной матрицы $W_g(p, \Delta)$ замкнутой системы по рассматриваемому возмущению, определяемую в форме максимума на оси частот ω максимального сингулярного числа $\sigma[W_g(j\omega, \Delta)]$ соответствующей матрицы $W_g(j\omega, \Delta)$ амплитудно-фазовых характеристик. Здесь p - перемен-

ная преобразования Лапласа и j - мнимая единица.

Требования к качественным показателям номинальной системы могут быть сформулированы в виде ограничения $\|W^0(p, \Delta)\|_\infty \leq M$ на H^∞ -норму матрицы $W^0(p, \Delta)$ ее передаточных функций по управляющему входу, а дополнительное достаточное условие робастной устойчивости - в форме неравенства $\|W^0(p, \Delta)\|_\infty \leq \gamma \|v(p)\|_\infty^{-1}$, обеспечивающего требуемую (в смысле оцениваемой числом $\gamma < 1$ близости к границе устойчивости) степень грубости системы по отношению к неструктурированным мультипликативным неопределенностям $\eta(p)$ характеристик модели объекта, ограничиваемым по H^∞ -норме на классе устойчивых возмущений заданной устойчивой функцией $v(p)$ [13, 25].

В итоге получаем ЗПО вида (5), (6) при $(y, z) = y = \omega$; $(x, z) = x = \omega$; $m = r = 1$;
 $L_1 = \Omega_1 = [0, \infty)$; $F_0(y, z, \Delta) = \sigma[W_g(j\omega, \Delta)]$;
 $F(x, z, \Delta) = \sigma[W^0(j\omega, \Delta)]$;
 $\varepsilon = \min \{M, \gamma \|v(p)\|_\infty^{-1}\} [20]$.

В скалярном случае H^∞ -нормы W_g и W^0 совпадают с соответствующими амплитудно-частотными характеристиками [25], и рассматриваемая ЗПО сводится к традиционной инженерной задаче выбора параметров регулятора заданной структуры, минимизирующего реактивность системы по отношению к аддитивным возмущениям в условиях заданного ограничения на величину показателя колебательности.

Техника применения альтернативного метода для решения параметризованных задач H^∞ -оптимизации систем управления демонстрируется на конкретных примерах в [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цыпкин Я.З.* Управление динамическими объектами в условиях ограниченной неопределенности. Современное состояние и перспективы развития // Измерения, контроль, автоматизация. 1991. № 3-4.
2. *Куржанский А.Б.* Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977.
3. *Красовский Н.Н.* Управление динамической системой. М.: Наука, 1985.
4. *Захаров В.Н.* Интеллектуальные системы управления: Основные понятия и определения // Известия академии наук. Теория и системы управления. 1997. № 3.
5. *Захаров В.Н.* Современная информационная технология в системах управления // Известия академии наук. Теория и системы управления. 2000. № 1.
6. *Захаров В.Н., Ульянов С.В.* Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. III. Методология проектирования // Известия академии наук. Техническая кибернетика. 1993. № 5.
7. *Мусеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981.
8. *Рапопорт Э.Я.* Робастная параметрическая оптимизация динамических систем в условиях ограниченной неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1995. № 3.
9. *Бернацкий Ф.И., Пащенко Ф.Ф.* Синтез робастных алгоритмов управления технологическими объектами // Автоматика и телемеханика. 1997. № 12.
10. *Бутковский А.Г.* Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965.
11. *Рапопорт Э.Я.* Задача равномерного приближения при оптимизации распределенной системы, описываемой уравнением параболического типа // Сиб. математ. журн. 1982. Т.23, № 5.
12. *Рапопорт Э.Я.* Альтернативные свойства оптимальных решений и вычислительные алгоритмы в задачах полубесконечной оптимизации управляемых систем // Известия академии наук. Теория и системы управления. 1996. № 4.
13. *Полак Э., Мейни Д.К., Стилмер Д.М.* Применение методов полубесконечной оптимизации для синтеза систем автоматического управления. Обзор // ТИИЭР. 1984. Т.72, №12.

14. Федоров В.В. Численные методы максимума. М.: Наука, 1979.
15. Левитин Е.С. Оптимизационные задачи с экстремальными ограничениями I-II // Автоматика и технология. 1995. № 7, 1995. №12.
16. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986.
17. Ульянов С.В. Нечеткие модели интеллектуальных систем управления: теоретические и прикладные аспекты (обзор) // Известия академии наук. Техническая кибернетика. 1991. № 3.
18. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат, 1991.
19. Негойцэ К. Применение теории систем к проблемам управления. М.: Мир, 1981.
20. Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод параметрического синтеза H^∞ -оптимальных систем автоматического управления // Известия академии наук. Теория и системы управления. 2000. №1.
21. Демьянов В.Ф., Васильев Л.В. Недифференцируемая оптимизация. М.: Наука, 1981.
22. Rapoport E. Y. Semi-Infinite Optimization of Controllable Processes // Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications. Proc. 2nd World Congress of Nonlinear Analysts. 1997. V.30, N6.
23. Рапопорт Э.Я. О чебышевских свойствах решений задач полубесконечной оптимизации // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. «Физико-математические науки». 1998. Вып. 6.
24. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993.
25. Барабанов А.Е., Первозванский А.А. Оптимизация по равномерно- частотным показателям (H^∞ -теория) // Автоматика и технология. 1992. № 9.

SEMI-INFINITE OPTIMIZATION OF CONTROLLED SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF THE BOUNDED UNCERTAINTY

© 2000 E.Ya. Rapoport

Institute for the Control of Complex Systems of the Russian Academy of Sciences, Samara

Models of the semi-infinite optimization are suggested for solving of parametrized control problems under conditions of the bounded uncertainty. These models can be easily extended as applied to fuzzy models of the theory of intelligent control systems. The method based on alternate properties of sought for extremals is used for the determination of optimal solutions. Examples of optimization problems statement are considered for the control of dynamic systems with distributed and concentrated parameters and for the parametric design of H^∞ -optimal regulators.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАНЕВРЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРБИТАЛЬНОГО САМОЛЕТА ПРИ СПУСКЕ В НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ

© 2000 Ю.Н. Лазарев¹, Т.А. Баяндина²

¹ Самарский научный центр РАН

² Самарский государственный аэрокосмический университет

Исследуются маневренные возможности орбитального самолета при спуске в атмосфере в нештатных ситуациях, связанных с прекращением его выведения на орбиту спутника Земли. Рассчитаны области достижимости и области возможного попадания с учетом ограничений на управление, режимы движения в атмосфере и терминальные условия.

Введение

В качестве объекта управления рассматривается орбитальный самолет (ОС), который является основным элементом многоцелевой авиационно-космической системы МАКС-ОС [1]. Выведение ОС на орбиту спутника Земли осуществляется следующим образом (рис.1). С поверхности Земли стартует составной летательный аппарат, состоящий из дозвукового самолета-носителя (СН) Ан-225 и ОС с внешним топливным баком (ВТБ). После прибытия в заданную область происходит разделение СН и ОС с ВТБ. Дальнейшее выведение осуществляется с помощью маршевых жидкостных ракетных двигателей ОС до

отделения ВТБ. Окончательный вывод на орбиту производится с использованием двигателей орбитального маневрирования ОС.

При возникновении нештатной ситуации на участке движения ОС с ВТБ предполагается экстренное отделение ВТБ и спуск ОС в атмосфере по траектории возвращения. Целью управления в этом случае является приведение ОС к началу участка предпосадочного маневрирования или в область параметров движения, в которой возможно срабатывание специальных средств спасения экипажа.

Управление движением ОС по траектории возвращения осуществляется изменени-

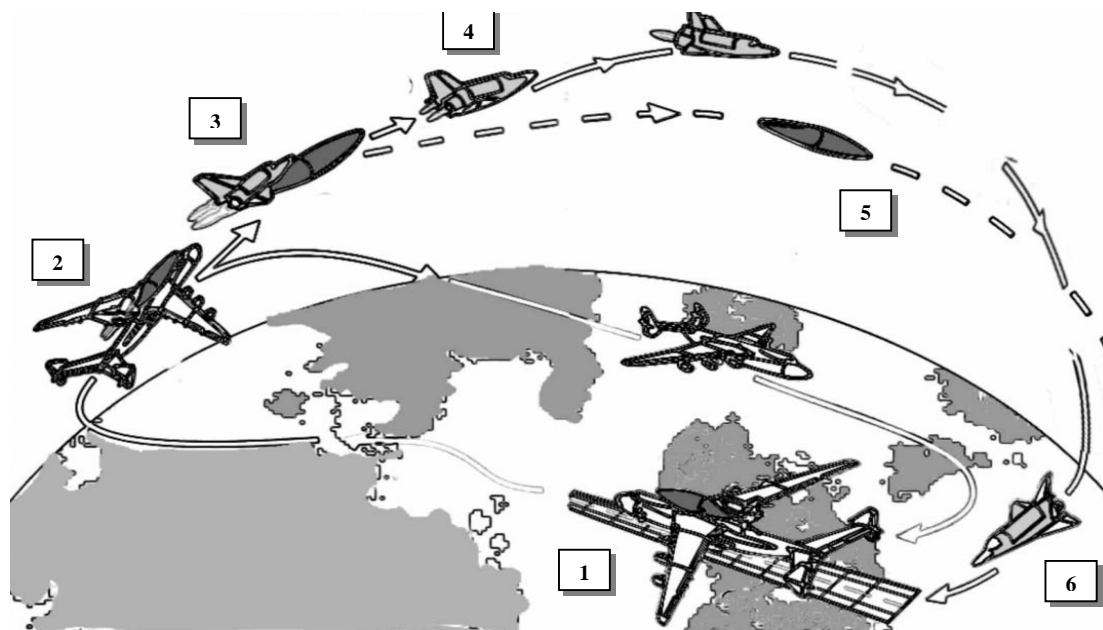


Рис.1. Траектории движения авиационно-космической системы
1 – взлет; 2 – отделение ОС с ВТБ от СН; 3 – движение ОС с ВТБ по траектории выведения; 4 – движение ОС по траектории возвращения; 5 – спуск ВТБ; 6 – посадка ОС

ем угла атаки и угла скоростного крена. При формировании управления учитываются ограничения на управляющие зависимости, режимы движения в атмосфере и терминальные условия.

Исследование маневренных возможностей ОС при спуске в нештатных ситуациях, связанных с движением по траектории возвращения, сводится к построению на высоте начала участка предпосадочного маневрирования областей достижимости и областей возможного попадания при движении из начальных условий, соответствующих параметрам рассматриваемого участка траектории выведения.

Постановка задачи

Участок траектории выведения ОС с ВТБ является множеством точек, фазовые координаты каждой из которых могут являться начальными условиями движения по траектории возвращения. Параметры выведения (скорость V , высота H , угол наклона траектории θ , продольная дальность L от точки разделения СН и ОС) при движении ОС с ВТБ меняются в широких пределах (рис.2).

Возможность совершения маневров при спуске в атмосфере зависит от располагаемого уровня механической энергии ОС. На рис.3 показано изменение удельной механической энергии E в зависимости от времени с момента начала движения ОС с ВТБ.

Построение границ областей достижимости и областей возможного попадания связано с формированием номинальных программ управления, обеспечивающих приведение ОС на их границы. Границы областей

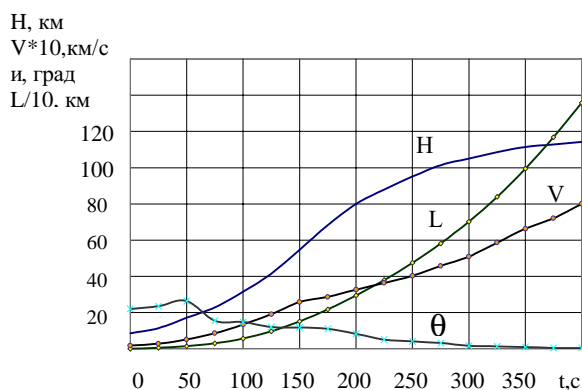


Рис. 2. Параметры движения ОС с ВТБ

состоят из крайних точек, в которые возможно попадание ОС при спуске по траектории возвращения, поэтому задачи формирования соответствующего управления формулируются как оптимизационные.

Таким образом, требуется сформировать оптимальные управляющие зависимости по каналам углов атаки и скоростного крена, обеспечивающие достижение ОС границ областей достижимости и возможного попадания при спуске в атмосфере по траектории возвращения с различными начальными условиями, соответствующими параметрам траектории выведения ОС с ВТБ, с учетом ограничений на управление, режимы движения в атмосфере и терминальные условия.

Метод решения

При решении задач оптимизации номинального управления использовался численный метод формирования многоканального управления движением в атмосфере, позволяющий учитывать ограничения на функционалы задачи и управляющие зависимости [2]. Численный метод разработан на основе метода последовательной линеаризации [3], который является типичным методом спуска в пространстве управлений и сводится к построению минимизирующей последовательности управлений. В результате применения численного метода формируется многоканальное приближенно-оптимальное управление.

Условия численного решения

В модели движения ОС при спуске в атмосфере учитывалась несферичность поля тяготения Земли и ее вращение вокруг собственной оси. Считалось, что рассматриваемый участок траектории выведения совпадает с плоскостью экватора. В качестве поверхности приведения принималась сфера с центром в центре Земли, проходящая на высоте 20 км над экватором.

Максимальное значение аэродинамического качества ОС на гиперзвуковых скоростях движения в атмосфере принималось равным 2,2. Аэродинамические характеристики ОС задавались таблично, также таблично задавались параметры атмосферы. Удельный

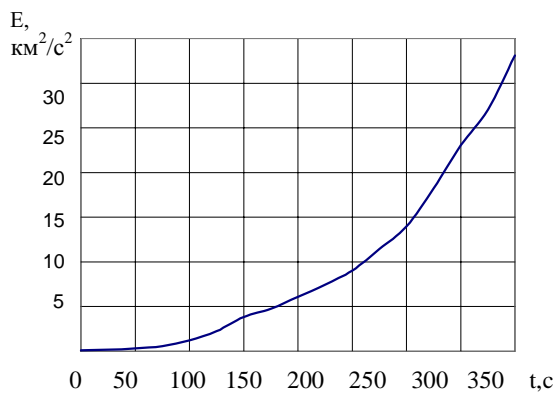


Рис. 3. Располагаемая удельная механическая энергия ОС в зависимости от времени с начала момента начала движения ОС с ВТБ

тепловой поток рассчитывался в условной критической точке поверхности аппарата с радиусом кривизны 1 м.

Параметры движения по траектории выведения являлись начальными условиями спуска по траектории возвращения. Значения скорости, угла наклона траектории и высоты (рис. 2) дополнялись нулевыми значениями угла пути, широты и долготы. Во всех задачах на управляющие зависимости накладывались ограничения: угол атаки мог изменяться от 10° до 45° , а угол скоростного крена по абсолютной величине не мог превышать 80° .

Построение областей достижимости и возможного попадания для заданных начальных условий движения выполнялось после решения серии однотипных оптимизационных задач:

- безусловной максимизации конечной

продольной дальности;

- безусловной максимизации конечной боковой дальности;

- безусловной минимизации конечной продольной дальности;

- максимизации конечной боковой дальности при различных требуемых значениях конечной продольной дальности;

- максимизации конечной продольной дальности при различных требуемых значениях конечной боковой дальности;

- минимизации конечной продольной дальности при различных требуемых значениях конечной боковой дальности.

Все оптимизационные задачи решались с учетом ограничений на управление, а также с учетом отдельных ограничений на терминальные условия и режимы движения в атмосфере, так и без их учета.

Результаты

Результаты математического моделирования спуска ОС в атмосфере и решения оптимизационных задач приведены на рис.4-6, на которых показаны области достижимости и области возможного попадания в координатах продольной L и боковой D дальностей спуска. Продольная дальность отсчитывалась в плоскости экватора по поверхности приведения от проекции точки разделения СН и ОС с ВТБ на эту поверхность, а боковая – по поверхности приведения от плоскости экватора. Значения времени, представленные на рисунках, соответствуют продолжительности движения ОС с ВТБ по тра-

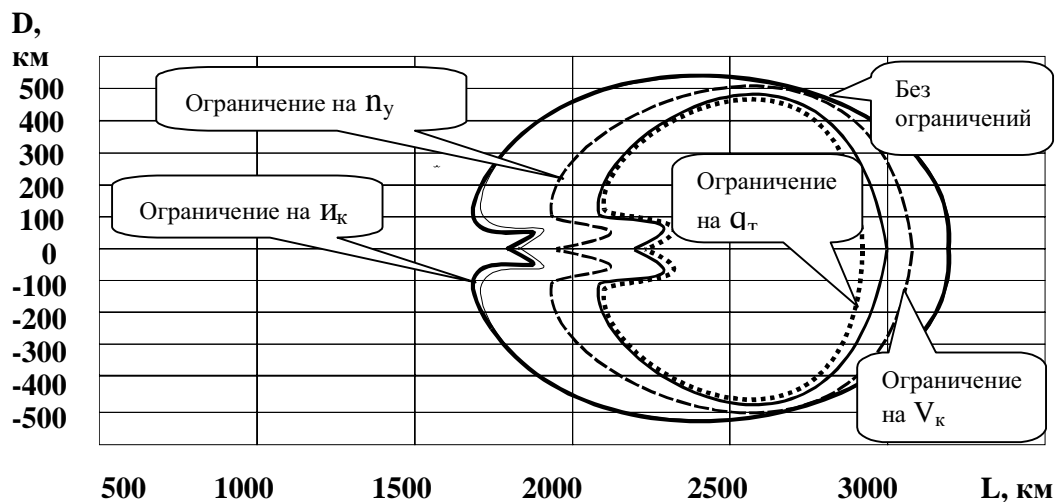


Рис. 4. Области достижимости без учёта и с учетом ограничений на режимы движения в атмосфере

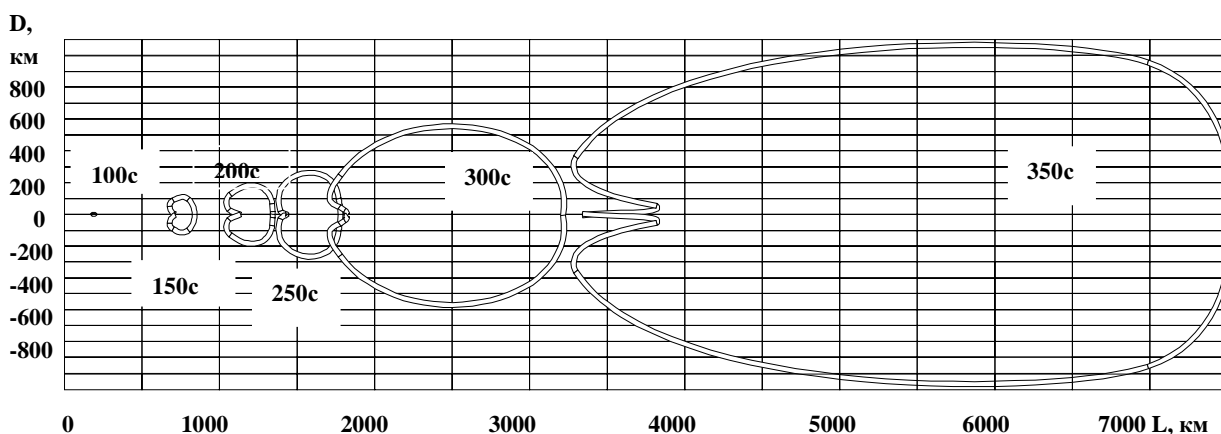


Рис. 5. Области достижимости для разных моментов разделения ОС и ВТБ

ектории выведения до экстренного отделения ВТБ.

На рис.4 приведены области достижимости без ограничений и с ограничениями на режимы движения в атмосфере и терминальные условия для начальных условий спуска, соответствующих 300-ой секунде движения по траектории выведения после разделения СН и ОС с ВТБ. К этому моменту времени выведения ОС обладает удельной механической энергией примерно вдвое меньшей, чем в конце участка выведения (рис.3). При построении областей достижимости учитывались ограничения на режимы движения в атмосфере: на максимальное значение нормальной перегрузки ($n_{y\max} \leq 3,5$) и на максимальное значение удельного теплового потока в критической точке поверхности аппарата ($q_{T\max} \leq 630 \text{ кДж} / \text{м}^2 \text{с}$), а также на терминальные условия: конечную скорость

($V_k = 500 \pm 30 \text{ м} / \text{с}$) и конечный угол наклона траектории ($\theta_k = 10^\circ \pm 1^\circ$).

На рис.5 приведены области достижимости, построенные для шести вариантов начальных условий без учета ограничений на режимы движения и терминальные условия. При построении областей начальные условия спуска соответствовали 350-ой секунде движения по траектории выведения после разделения СН и ОС с ВТБ, затем 300-ой и далее в сторону уменьшения с шагом 50 секунд до практического вырождения области достижимости в точку (в этом случае начальные условия спуска соответствуют примерно 100-ой секунде движения ОС с ВТБ).

На рис.6 показаны области возможного попадания ОС на поверхность приведения. Каждая область строилась как огибающая областей достижимости, полученных для различных моментов начала движения по тра-

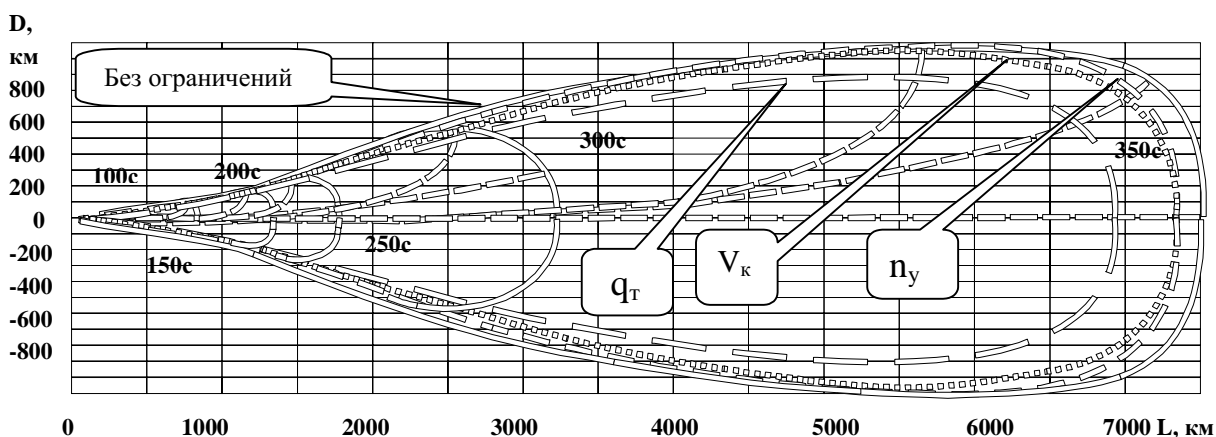


Рис. 6. Области возможного попадания ОС на поверхность приведения для разных моментов разделения ОС и ВТБ

ектории возвращения. Для момента начала движения по траектории возвращения, соответствующего 350-ой секунде, показаны области возможного попадания, рассчитанные с учетом ограничений на режимы движения в атмосфере и терминальные условия. Для области возможного попадания без ограничений штриховой линией показаны траектории спуска для точек, соответствующих максимальной продольной дальности спуска, максимальной боковой дальности спуска и максимальной боковой при фиксированной продольной дальности спуска.

Обсуждение результатов

Существование областей достижимости с учетом ограничений на режимы движения в атмосфере и терминальные условия на высоте начала участка предпосадочного маневрирования свидетельствует о принципиальной возможности приведения ОС в любую точку поверхности внутри области достижимости и выполнения предпосадочных маневров.

Начиная примерно с 100-й секунды движения по траектории выведения ОС с ВТБ в случае нештатной ситуации и экстренного отделения ВТБ от ОС возможно возвращение ОС в некоторую область на сфере приведения, т.е. появляется возможность маневрирования при спуске в атмосфере, целью которого может быть приведение ОС к началу участка предпосадочного маневрирования

или в область параметров движения, в которой возможно срабатывание специальных средств спасения экипажа.

Области возможного попадания характеризуют маневренные возможности ОС при возникновении рассматриваемых нештатных ситуаций для всего участка траектории выведения ОС с ВТБ.

Результаты математического моделирования свидетельствуют о значительных маневренных возможностях ОС при спуске в атмосфере в нештатных ситуациях, связанных с прекращением его выведения на орбиту спутника Земли. Эти возможности могут быть реализованы при двухканальном управлении ОС с учетом ограничений на режимы движения в атмосфере, терминальные условия и управляющие зависимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авиационно-космические системы* / Под ред. Г.Е. Лозино-Лозинского и А.Г. Братухина. М.: МАИ, 1997.
2. *Лазарев Ю.Н.* Численный метод формирования многоканального управления движением аэрокосмических аппаратов в атмосфере // *Известия Самарского научного центра РАН*. 1999. № 1.
3. *Федоренко Р.П.* Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978.

RESEARCH OF MANEUVERABLE POSSIBILITIES OF ORBIT PLANE AT DESCENT IN ATMOSPHERE IN CONTINGENCIES

© 2000 Yu. N. Lazarev¹, T. A. Bayandina²

¹Samara Science Centre of Russian Academy of Sciences

²Samara State Aerospace University

The maneuverable possibilities of an orbit plane are researched at a descent in atmosphere in contingencies, connected with an extinction of its deduction into Earth satellite orbit. The areas of an accessibility and area of probable hit with satisfaction of limitations on control, conditions of driving in atmosphere and terminal conditions are calculated.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ АКТИВНЫХ ОПОР

© 2000 В.Н. Самсонов, В.Б. Балякин

Самарский государственный аэрокосмический университет

В работе рассмотрены методы и средства управления динамическими характеристиками активных опор роторных и стендовых систем с помощью регуляторов расхода. Рассмотрены случаи работы опор с газовой и жидкостной пленкой для различных режимов течения рабочей среды. Исследовано влияние параметров систем управления на динамические характеристики опор различного назначения. Показан метод выбора оптимального регулятора для активной опоры, работающей при заданном виде возбуждения.

Опорные узлы современных технических систем в силу повышающихся тактико-технических требований нередко выполняются с использованием устройств активного типа с регулируемыми параметрами. В качестве управляющих элементов в активных опорах с внешним нагнетанием смазки, например, в гидро- и газостатических подшипниках и подпятниках, пневмогидростатических опорах (ПГСО), гидродинамических

демпферах, могут быть использованы регуляторы расхода различных типов (рис.1).

Регулятор расхода в таких устройствах в общем случае представляет собой гидравлическое сопротивление, величина которого изменяется в зависимости от давления на входе $P_{вх}$ и в рабочей камере P_K опоры. Они достаточно просто komponуются в опорах и обеспечивают существенное изменение их динамических характеристик. Регуляторы устанавливаются на входе в опоры и имеют активные связи пневмогидравлического и механического типа. Однако применение того или иного регулятора обуславливается необходимостью обеспечения заданного закона регулирования. Таким образом в процессе проектирования активных опор для выбора типа и параметров регуляторов расхода необходимо знать их законы регулирования. Активные связи в опорных узлах формируют дополнительные усилия, воздействующие на подвижную массу и зависящие от значений входных и выходных координат.

Использование положений теории релаксационного демпфирования позволило получить динамическую реакцию опорной системы в виде [1]

$$C_{динP}(S) = C \frac{T_1 S + 1 + W_2(S) - W_4(S)}{T_2 S + 1 - W_1(S) + W_3(S)},$$

$W_1(S) - W_4(S)$ - передаточные функции дополнительных каналов взаимодействия между входной координатой и давлением в рабочей камере опоры;

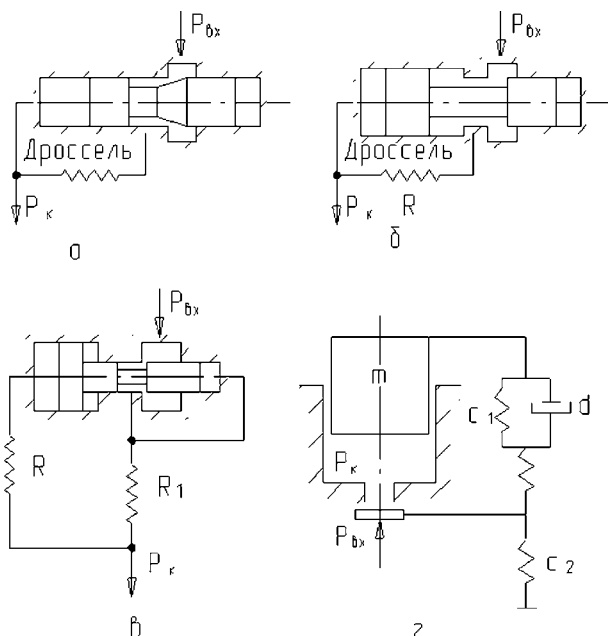


Рис. 1. Типы регуляторов расхода для опор с внешним нагнетанием смазки
 а- регулятор постоянного расхода;
 б- интегрирующий регулятор;
 в- дифференциальный регулятор; г- регулятор с дополнительной механической связью

$$W_1(S) = \frac{\gamma_1 W_{1n}}{b_2 - b_1}; W_2(S) = \frac{\gamma_1 W_{1M}}{a_1 - a_2};$$

$$W_3(S) = \frac{\gamma_2 W_{2n}}{b_2 - b_1}; W_4(S) = \frac{\gamma_2 W_{2M}}{a_1 - a_2}.$$

В каждом из каналов осуществляется преобразование координаты перемещения подвижной массы в ход элемента исполнительного устройства регулятора, которое далее преобразуется в изменение расхода рабочего тела. Преобразовательное устройство может быть механическим с передаточными функциями $W_{1M}(S)$, $W_{2M}(S)$ или пневмогидромеханическим $W_{1II}(S)$, $W_{2II}(S)$.

В зависимости от формы гидравлического тракта регулятора величины γ могут быть как постоянными величинами (для золотника и регулятора сопло-заслонка) или функциями от S .

Введение дополнительных связей в опорах оказывает влияние на динамическую реакцию газового слоя и на резонансные характеристики системы. Закономерности этого влияния могут быть выявлены после опре-

деления передаточных функций элементов активных устройств и при учете их взаимодействия с другими структурными составляющими опорных узлов. Далее покажем это.

Сопло с дроссельной заслонкой

Регулятор расхода сопло-заслонка, имеющее сравнительно простую конструкцию (рис.2,а), широко используется в устройствах гидропневмоавтоматики. Оно состоит из сопла 1 и заслонки 2. Параметром регулирования является зазор x между соплом и заслонкой, изменяющейся при перемещении заслонки. Эффективное регулирование сопротивления регулятора сопло-заслонки возможно лишь при малых зазорах x между заслонкой и торцом сопла [2]. Обычно величина x не превышает $0,25 d_c$, так как при $x=0,25 d_c$ площадь сопла становится равной площади щелевого дросселя $\pi d_c x$. Однако, на практике заслонка оказывает дросселирующее действие

при значениях $x = (1,4 - 1,6) \frac{d_c}{4}$ [3]. Расчет

дросселя состоит в определении его расходной характеристики. Для жидкости расход через дроссель рассматривают в виде

$$M = \alpha F_{др} \sqrt{2(P_{ex} - P_k) \rho}$$

α - коэффициент расхода через питающее отверстие находится экспериментально (обычно $\alpha = 0,62 \dots 0,82$); $F_{др}$ - площадь дросселя, равная минимальной из площадей $\pi d_c x$ и $\pi d_c^2 / 4$; ρ - плотность жидкости.

В работе [2] отмечено, что для газа при малых открытиях сопло-заслонка часто работает как ламинарный, а при больших - как турбулентный дроссель. Расходные характеристики дросселя для этого случая определяются по зависимостям для сверхкритического истечения газа

$$M = \alpha F_{др} P_{ex} \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa - 1) gRT} \left[\beta^{\frac{2}{\kappa}} - \beta^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}.$$

Для докритического истечения

$$M = \alpha F_{др} P_{ex} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa + 1) gRT}},$$

где κ - показатель адиабаты; R - газовая посто-

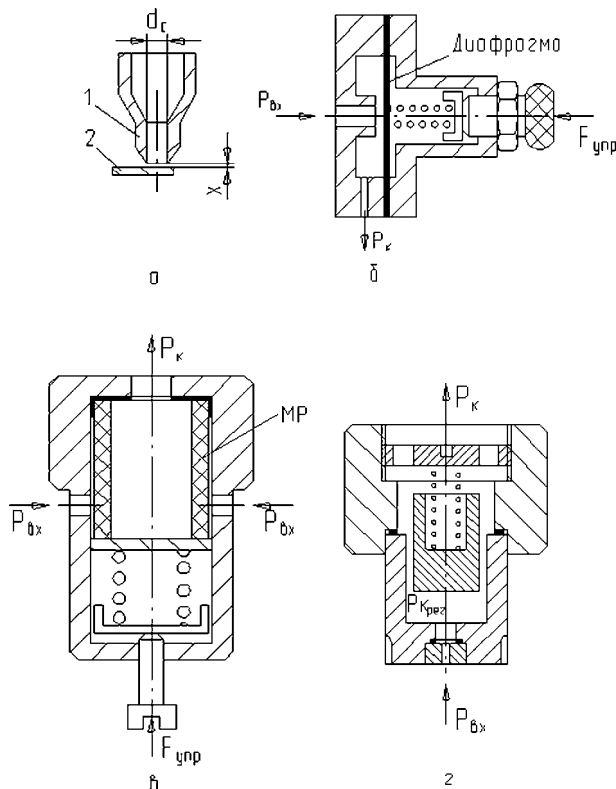


Рис. 2. Схемы регуляторов расхода
 а- регулятор сопло -заслонка;
 б- мембранный регулятор; в- регулятор расхода из МР; г- регулятор гидростатического типа

янная; g - ускорение свободного падения; T - абсолютная температура ; $\beta = P_{к.}/ P_{ex}$.

Значение коэффициента расхода определяется по экспериментальным данным, приведенным в работах [2,3]. Для этого предварительно находится вспомогательная величина

$$\frac{\alpha}{Re} = f(Re) = \frac{\mu}{P_{ex} x} \sqrt{\frac{\kappa-1}{2\kappa} gRT \left[\beta^{\frac{2}{\kappa}} - \beta^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]},$$

по которой отыскивается коэффициент расхода α [2].

Сопло-заслонка является усилителем с коэффициентом усиления для жидкости

$$\kappa = \frac{\partial M}{\partial x} = \alpha \pi d_c \sqrt{2(P_{ex} - P_{к})\rho},$$

а для газа

$$\kappa = \frac{\partial M}{\partial x} = \alpha \pi d_c P_{ex} \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa-1)gRT} \left[\beta^{\frac{2}{\kappa}} - \beta^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}.$$

В приборах пневмогидроавтоматики заслонкой управляет маломощный чувствительный элемент. В активных опорах заслонка регулятора связана с перемещениями подвижного элемента опоры механически или пневмогидравлически. В общем случае связь механического типа (рис.1,г) имеет передаточную функцию вида

$$W_2 = \frac{\delta x}{\delta l} = \frac{C_1 + dS}{m_1 S^2 + dS + C_1 + C_2},$$

где m_1 - масса заслонки (подвижного органа регулятора); C_1, C_2 - жесткости, а d - демпфирование элементов связи.

Массой заслонки обычно можно пренебречь и в результате получаем передаточную функцию дополнительной активной связи механического типа, вносимой регулятором сопло-заслонка,

$$W_2(S) = k_p \frac{1 + T_{1p}S}{1 + T_{2p}S},$$

где $k_p = \frac{\kappa C_1}{(a_1 - a_2)(C_1 + C_2)}$ - коэффициент

усиления; $T_{1p} = \frac{d}{C_1}$ и $T_{2p} = \frac{d}{C_1 + C_2}$ - постоянные времена регулятора.

В случае пневмогидравлической связи между опорой и регулятором его подвижный элемент снабжается упругим элементом с жесткостью C_{II} . При этом передаточная функция W_{II} отыскивается из уравнения равновесия всех сил, действующих на заслонку,

$$m_1 S^2 \delta x - \delta P + C_{II} \delta x = 0.$$

Сила, действующая на заслонку со стороны сопла равна $P = P_1 + P_2$, где P_1 - реактивная сила, возникающая при попадании потока на заслонку и растекании его по поверхности заслонки при повороте на угол $\pi/2$; P_2 - сила статического давления, действующая на торец сопла и заслонку. Она определяется по формуле [3]

$$P = \frac{4M^2}{\pi d_c^2 \rho_c} + \pi \frac{d_c^2}{4} (P_1 - P_2) + \left[2\pi \int_{\frac{d_c}{2}}^{\frac{d_H}{2}} P_r r dr - \pi P_2 \left(\frac{d_H^2 - d_c^2}{4} \right) \right],$$

где ρ_c - плотность рабочей среды на срезе сопла, d_H - диаметр торца, P_r - текущее значение давления между торцом сопла и заслонкой, r - текущий радиус.

Сила давления на торце сопла $\int P_r r dr$ определяется с помощью экспериментальных

данных. Если величина $\frac{d_H - d_c}{2}$ мала, то силовую характеристику дросселя типа сопло - заслонка, т.е. зависимость силы P от зазора x , с достаточной точностью можно определить по приближенным зависимостям [2].

Подставляя в уравнение (7) приращение силы P в виде $\delta P = \frac{\partial P}{\partial P_1} \delta P_1$, получаем передаточную функцию регулятора типа сопло - заслонка

$$W_{II} = \frac{\delta x}{\delta P_1} = \frac{\partial P / \partial P_1}{(b_2 - b_1) C_{II}},$$

где C_{II} - жесткость упругого элемента заслонки.

Массой m_1 заслонки можно пренебречь

и тогда передаточная функция пневмогидравлической активной связи, вносимой соплом - заслонкой, имеет вид

$$W_1 = k_p = k \frac{\partial P / \partial P_1}{(b_2 - b_1) C_{II}}.$$

Следует заметить, что для регулятора расхода этого типа передаточная функция $W_1(S)$ вследствие наличия диссипативных сил в зазоре и упругом элементе в действительности близка к передаточной функции аperiодического звена

$$W_1(S) = \frac{k_p}{T_p S + 1}.$$

Золотниковый регулятор расхода

Золотниковые регуляторы значительно реже, чем сопло - заслонка, используются в пневматических устройствах. Они выполняются с малыми зазорами между втулкой и золотником и при работе на недостаточно очищенном воздухе или без смазки (вследствие трения и износа рабочих поверхностей) имеют пониженную чувствительность, нестабильны, возможны отказы в работе. Золотники могут иметь коническую или цилиндрическую (рис. 1, а, б) дросселирующую щель и реализуют закон управления вида

$$W_1(S) = \frac{k_p}{T_p S + 1}.$$

Мембранный регулятор

В работе [4] предложено для повышения жесткости гидростатических опор использовать мембранный регулятор расхода (рис. 2, б), представляющий собой щелевое сопротивление, величина которого изменяется при перемещении мембраны. Передаточная функция $W_1(S)$ этого регулятора при наличии потока несжимаемой жидкости в трактах получена в виде

$$W_1(S) = \frac{T_{1p} S + 1}{T_{4p} S^2 + T_{2p} S + 1} k_p.$$

Использование его в газостатических опорах требует уточнения вида $W_1(S)$. Это связано со сжимаемостью газа. Учет динамических эффектов при сдавливании газа в рабочей щели оказывает существенное влияние

на динамическую реакцию газового слоя, и, следовательно, на закон управления регулятора $W_1(S)$.

Уравнение равновесия сил, действующих на мембрану m_1 , в приращениях имеет вид

$$m_1 S^2 \delta x + C_M \delta x + \delta W = f_1 \delta P_K, \quad (1)$$

где $\delta W = C_{дин}(S) \delta x$ - приращение динамической реакции сдавливаемой газовой пленки в зазоре, C_M - жесткость мембраны, $f_1 = \pi r_1^2$; r_1 - внутренний радиус щели.

Для отыскания $W_{1II} = \delta x / \delta P_K$ необходимо найти величину δW . Для этого примем следующие допущения.

1. Величина зазора x много меньше линейных размеров пластины и мембраны;
2. Поток газа в рабочей щели считается ламинарным, что предполагает малые числа Re и параболический профиль скоростей в зазоре;
3. В любой точке потока выполняется

$$\text{соотношение } \frac{P}{\rho^n} = const;$$

4. Приращения δx и δP_K малы по сравнению со статическими x_0 и P_{K0} соответственно.

Воспользуемся результатами работы [5], где решено уравнение Рейнольдса для кольцевого упорного подпятника. Сила, действующая на сжимаемые пластины, равна

$$\delta W(t) = \pi (r_2^2 - r_1^2) \int_{\bar{r}_1}^1 \delta P(t, \bar{r}) d\bar{r}, \quad (2)$$

где $\bar{r}_1 = r_1 / r_2$; $\bar{r} = r / r_2$; r_2 - наружный радиус щели. Применяя к (2) преобразование Лапласа временной функции

$$\delta W(S) = \int_0^{\infty} \delta W(t) e^{-st} dt,$$

получаем выражение для динамической реакции газовой пленки в виде суммы бесконечного ряда

$$C_{дин}(S) = - \frac{\delta W(S)}{\delta x(S)} = \frac{48 \pi \mu r_2^4}{x_0^3} \sum_{K=1}^{\infty} \frac{S}{\eta_K^4 (1 + S)}.$$

Проведенные исследования показывают его быструю сходимость. Поэтому возможно приближенное равенство

$$C_{дин}(S) \approx \frac{b_s}{1 + S/\omega_c}, \quad (3)$$

где

$$b = \frac{48\mu r_2^4(1 + \beta)(1 - \bar{r})^2}{\pi x_0^3}; \omega_c = \frac{\pi^2 n x_0^2 P_{к0}}{12\mu r_2^2(1 - \bar{r})^2}.$$

Подставляя выражение (3) в уравнение равновесия (1), получаем передаточную функцию пневматической связи

$$W_{1л} = \frac{\delta x}{\delta P_K} = \frac{f_1 \eta_l}{m_1 S^2 \eta_l + C_M \eta_l + b_3},$$

где $\eta_l = 1 + S / \omega_c$.

Для отыскивания закона управления регулятора $W_1(S) = \frac{\gamma_1}{b_2 - b_1} W_{1л}$ найдем величину $\gamma_1(S)$. Расход газа в сечении радиусом r_2 для рабочей щели определяется в динамике как

$$M = M_{ex} - S(\rho v), \quad (4)$$

где $v = \pi(r_1^2 - r_2^2)x$. Из выражения (4) получаем, что

$$\gamma_1(S) = \frac{\partial M}{\partial u} = \frac{\partial M}{\partial x} = \xi_1 + \xi_2 S, \quad (5)$$

где $\xi_1 = \frac{\partial M_{ex}}{\partial x}$; $\xi_2 = -\rho\pi(r_1^2 - r_2^2)$.

Это позволяет отыскать функцию $W_1(S)$ в виде

$$W_1(S) = k_p \frac{T_{3P} S^2 + T_{1P} S + 1}{T_{6P} S^3 + T_{4P} S^2 + T_{2P} S + 1},$$

где $k_p = \frac{f_1 \xi_1}{(b_2 - b_1) C_M}$ - коэффициент усиления регулятора;

$$T_{1P} = \frac{1}{\omega_c} + \frac{b}{c_M}, T_{2P} = \frac{1}{\omega_c} + \frac{\xi_2}{\xi_1},$$

$$T_{3P} = \frac{\xi_2}{\xi_1 \omega_c}, T_{4P} = \frac{m}{C_M}, T_{6P} = \frac{m}{C_M \omega_c}.$$

постоянные времени регулятора.

Видно, что передаточная функция дополнительной связи, обеспечиваемая мембранным регулятором, имеет высокий порядок, что затрудняет ее исследование. Однако, в области низких частот, характерных для работы опорных узлов, можно пренебречь членами высших порядков. В этом случае закон управления мембранного регулятора имеет вид

$$W_1(S) = k_p \frac{T_{1P} S + 1}{T_{2P} S + 1}.$$

Необходимо добавить, что это упрощение не распространяется на устойчивость опоры.

Регулятор расхода из МР

Пористый материал МР(металлорезина) может быть использован в качестве упругого и дросселирующего элемента регуляторов расхода, изменяющего свою пористость при изменении давления в камере или нагрузке, приложенной к элементу из МР. Конструкция упругого дросселя из МР показана на рис.2,в. Параметр регулирования - перемещение основания x . Течение газа только радиальное. Одним торцом упругая втулка крепится к основанию, другой - заглушен. По дросселирующим характеристикам регулятор расхода с МР может быть подобен мембранному регулятору, т.е. щели и заслонке с зазором h_3 . Для последнего получено выражение для динамической реакции пленки (3), которое может быть использовано для расчета динамической реакции слоя в МР. Для этого необходимо отыскать зазор h_3 щелевого дросселя - аналога МР, величина которого определяется из условия равенства гидродинамических сопротивлений МР и дросселирующей щели, т.е. $R_{MP}(x) = R_{щ}(h_3)$. При этом должны выполняться равенства $R_{MP}(x_0) = R_{щ}(h_{30})$ и

$$\left(\frac{\partial R_{щ}}{\partial h_3} \right)_0 \delta h_3 = \left(\frac{\partial R_{MP}}{\partial x} \right)_0 \delta x_0. \text{ Отсюда}$$

$$\delta h_3 = \left(\frac{\partial R_{MP}}{\partial x} / \frac{\partial R}{\partial h_3} \right)_0 \delta x. \quad (6)$$

В соответствии с (3) и (6) получаем выражение для динамической реакции

$$C_{\text{дин}}(S) = \left(\frac{\partial R_{MP}}{\partial x} / \frac{\partial R_{\text{ш}}}{\partial h_3} \right)_0 \frac{bS}{1 + S/\omega_c}, \quad (7)$$

$$W_{II}(S) = \frac{\delta x}{\delta P_K} = \frac{f_1 \left(1 + \frac{S}{\omega_c} \right)}{\left(mS^2 + C_{MP} \right) \left(1 + \frac{S}{\omega_c} \right) + bS},$$

где C_{MP} - жесткость втулки из МР.

С учетом выражений (5), (6), (7) получаем передаточную функцию дополнительной активной связи, обеспечиваемой регулятором расхода с МР, в виде:

$$W_1(S) = k_p \frac{T_{3P}S^2 + T_{1P}S + 1}{T_{6P}S^3 + T_{4P}S^2 + T_{2P}S + 1},$$

где

$$k_p = \left(\frac{\partial R_{MP}}{\partial x} / \frac{\partial R_{\text{ш}}}{\partial h_3} \right)_0 \frac{f_1 \xi_1}{C_{MP}(b_2 - b_1)},$$

$$T_{1P} = \frac{1}{\omega_c} + \frac{\xi_2}{\xi_1}, T_{2P} = \left(\frac{\partial R_{MP}}{\partial x} / \frac{\partial R_{\text{ш}}}{\partial h_3} \right)_0 \frac{b}{C_{MP}} + \frac{1}{a_c}$$

$$T_{3P} = \frac{\xi_2}{\xi_1 \omega_c}, T_{4P} = \frac{m}{C_{MP}}, T_{6P} = \frac{m}{\omega_c C_{MP}}.$$

Для определения гидродинамического сопротивления втулки из МР воспользуемся зависимостями, полученными в работе [6]. Для ламинарного потока через материал МР расход равен

$$M = 4\pi r_1 L \frac{\Pi^3 d_{\text{ш}}^2 \Delta P \rho}{153\mu(1-\Pi)^2 \frac{r_1}{\Delta r} \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

$\Delta P = P_{ax} - P_K$, $\Delta r = r_2 - r_1$, $d_{\text{ш}}$ - диаметр где
 проволоки, Π - пористость материала, для газа

$$\rho = P_{CP} / RT$$

Для турбулентного режима течения через втулку из МР

$$\frac{\Delta P}{\Delta r} = \frac{153(1-n)^2}{4\pi L r_1 n^3 d_{\text{ш}}^2 \rho} \mu \frac{r_1}{\Delta r} \ln \frac{r_2}{r_1} M + \frac{1,42(1-n)r}{8\pi^2 L^2 r_1^2 n^3 d_{\text{ш}} r_2 \rho} M^2.$$

ПГСО как регулятор расхода

Наличие в ПГСО кольцевой дросселирующей щели переменной длины делает возможным использование ее в качестве регулятора (рис.2,г). Закон управления, осуществляемый этим регулятором, отыскивается из уравнения равновесия всех сил, приложенных к плунжеру

$$m_1 S^2 \delta x + (\delta P_{KP} - \delta P_K) F_{KP} - C_{\text{ПП}} \delta x = 0$$

и выражения для динамической реакции слоя

$$C_{\text{динМР}} = \frac{F \delta P_{KP}}{\delta x} = C_P \frac{1 + T_{1P}S}{1 + T_{2P}S}. \text{ При этом}$$

$$u(S) = \frac{\delta M}{\delta x} = - \frac{\pi d_{\text{ш}} \delta_{\text{ш}}}{24 \mu g R T} \frac{\bar{P}_{KP} - \bar{P}_K^2}{x^2} = k;$$

$$W_{II}(S) = \frac{\delta x}{\delta P_K} = \frac{\eta_2}{\frac{m}{F_{KP}} \eta_2 S^2 + C T_{1P}S + C_P - C_{\text{ПП}}};$$

$$W_2(S) = \frac{k \eta_2}{B \left[\frac{m_1}{F_K} \eta_2 S^2 + H S + C_P - C_{\text{ПП}} \right]},$$

где

$$\eta_2 = 1 + T_{2P}S, B = (b_2 - b_1), H = (C T_{1P} - C_{\text{ПП}} T_{2P}).$$

Полученное выражение для области низких частот может быть упрощено до вида

$$W_2(S) = k_p \frac{1 + B_1 S}{1 + H_1 S},$$

$$k_p = \frac{k}{C_P - C_{\text{ПП}}}, B_1 = T_{2P},$$

где

$$H_1 = \frac{C_P T_{1P} - C_{\text{ПП}} T_{2P}}{C_P - C_{\text{ПП}}}.$$

Возможность широкого изменения параметров регулятора k_p , B_1 и H_1 и наличие отработанной методики расчета делает регулятор этого типа весьма удобным для использования в гидрогазостатических опорах.

На рис.3-4 показаны амплитудно-частотные характеристики опор при различных значениях параметров регуляторов расхода k_p , T_{1P} , T_{2P} . Их анализ позволяет заключить, что использование дросселей типа «сопложаслонка» и золотника с коэффициентом усиления $k_p < 0$ уменьшает, а с $k_p > 0$ - увеличивает

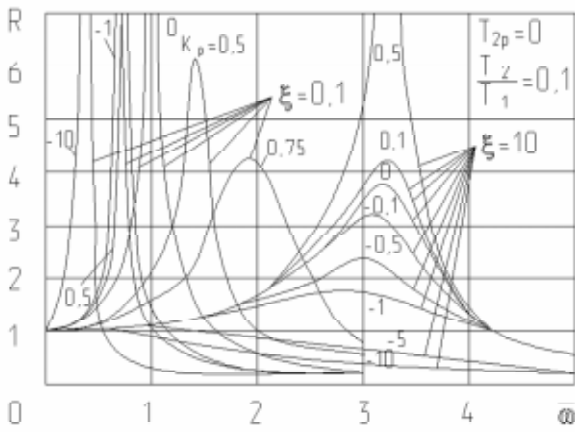


Рис. 3. АЧХ опоры с регулятором типа сопло - заслонка

ет резонансную частоту. Влияние параметров регулятора на величину коэффициента усиления вибрации на резонансе зависит от значений параметра $\xi = T_1 \omega_0$ (рис. 3).

Результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик опор с мембранным, гидростатическим регулятором расхода и из материала МР приведены на рис.4. Влияние параметров k_p, T_{2p} на АЧХ опоры аналогично результатам, полученным для сопла с дроссельной заслонкой и золотником. Увеличение постоянной времени T_{1p} с отрицательным коэффициентом усиления снижает резонансные частоты опоры, для которой $\xi \geq 10$. При

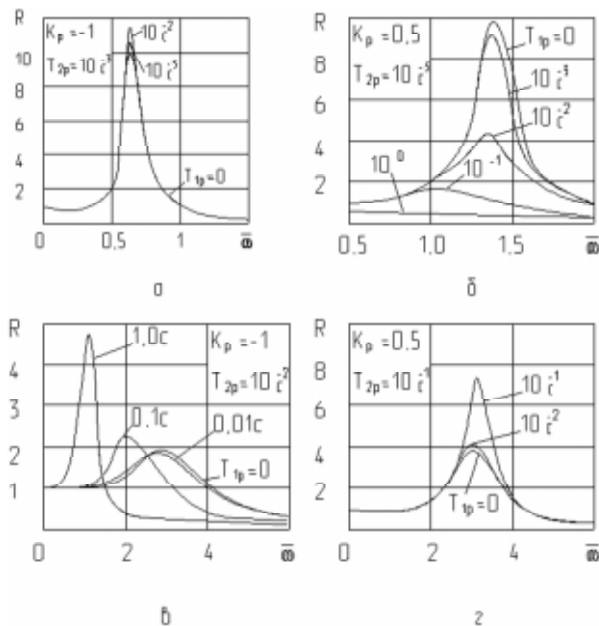


Рис. 4. АЧХ опор с регуляторами мембранного, гидростатического типа и из МР
а, б - $\xi = 10$; в, г - $\xi = 0,1$

этом уменьшается коэффициент усиления на резонансе. Для опоры с $\xi \leq 1$ изменение T_{1p} в пределах, соответствующих устойчивым режимам работы, или практически не влияет на АЧХ системы, или приводит к незначительному увеличению резонансного пика. Использование регуляторов расхода с $k_p > 0$ приводит к обратным результатам.

Выбор оптимального регулятора

Повышение качества работы активных систем невозможно без выбора схемы и структуры регулятора и определения его оптимальных параметров. Для синтеза опоры, оптимальной по динамическим характеристикам, используется метод оптимальной фильтрации Винера [7]. Процедура оптимизации заключается в отыскании передаточной функции $\kappa_{opt}(S)$ оптимальной опорной системы, а по ней - передаточной функции регулятора расхода. Знание законов управления, реализуемых различными регуляторами, позволяет преодолеть трудности, связанные с реализацией передаточных функций в конкретную физическую систему.

Для составления интегрального уравнения Винера-Хопфа и получения $\kappa_{opt}(S)$ воспользуемся критериальными функциями, включающими квадратичные значения (среднеквадратичные - для случайных процессов; интегральные квадратичные - для детерминированных) относительного перемещения \bar{x} и ускорения на выходе $S^2 \bar{x}_2$,

$$F = E[\bar{x}^2] + \rho E[(S^2 \bar{x}_2)^2]$$

или

$$F = E[(S^2 \bar{x}_2)^2] + \rho E[\bar{x}^2] \quad (8)$$

- для случайных процессов;

$$F = J\bar{x} + \rho JS^2 \bar{x}_2 \quad \text{или} \quad F = JS^2 \bar{x}_2 + \rho J\bar{x} \quad (9)$$

- для детерминированных процессов,

где ρ - неопределенный множитель Лагранжа.

Критерии (8), (9) удобны для аналитических расчетов и применяются для выбора структуры и параметров опорной системы.

Решение для оптимальной синтезированной функции $\kappa_{opt}(S)$ получено вариационными методами в работе [7] и имеет вид

$$\kappa_{opt}(S) = \frac{[\Gamma(S) / \Delta^-(S)]}{\Delta^+(S)},$$

где $\Gamma(S) = 2\pi\Phi(S) / S^4$ - преобразование Фурье для взаимно-корреляционной функции входа и выхода;

$$\Delta(S) = \Delta^+(S) \cdot \Delta^-(S) = 2\pi \left(\frac{1}{S^4} + \rho \right) \Phi(S)$$

- преобразование Фурье для корреляционной

функции входа; $\Phi(S) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-St} R(\tau) dt$ - спек-

тральная плотность входного сигнала в операторной форме; $R(\tau)$ - корреляционная функция входа.

Индексы «+» и «-» показывают, что полюса и нули функции находятся соответственно в левой и в правой полуплоскостях. Функция $\kappa_{opt}(S)$ и соответствующая структура оптимального регулятора зависят от характера входного возмущения.

В случае, когда вибрация основания представлена белым шумом, оптимальная функция $\kappa_{opt}(S)$ может быть реализована простейшей системой упругодемпфирующей подвески, представляющей параллельное включение демпфера и упругости. Для этого случая нет необходимости использовать активную систему.

Для узкополосного спектра с корреляционной функцией $R(\tau) = D_i e^{-\alpha|\tau|}$ и плотнос-

тью $\Phi(S) = \frac{D_i}{\pi} \frac{\alpha}{d^2 - S^2}$, где D_i - дисперсия возбуждения; α - коэффициент затухания корреляционной функции, функция $\kappa_{opt}(S)$ имеет вид

$$\kappa_{opt}(S) = \frac{C_2 S^2 + C_1 S + C_0}{S^2 + 2b\alpha + 2b^2}. \quad (10)$$

Здесь коэффициенты

$$C_0 = 2b^2; C_1 = 2b; C_2 = \frac{2b(\alpha + b)}{\alpha^2 + 2b\alpha + 2b^2}; b = \sqrt{\frac{\rho}{4}}$$

уточнены по сравнению с полученными в работе [8].

Структуру и параметры оптимального регулятора расхода найдем после преобразований частотной передаточной функции

опорного узла и выражения (10). В первом приближении в частотной характеристике передаточной функции можно пренебречь членом $T_2 S^3$, слабо влияющим на АЧХ опорного узла в области низких частот, и записать

$$K(S) = \frac{\omega_0^2 (T_1 S + 1)}{S^2 [1 - W_1(S)] + \omega_0^2 (T_1 S + 1)}. \quad (11)$$

Приравняв числители и знаменатели выражений (10) и (11), получаем, что оптимальная передаточная функция может быть реализована с регулятором, осуществляющим закон управления $W(S) = k_p / (1 + T_p S)$. Коэффициенты k_p и T_p определяются через известные параметры вибрации и собственную частоту опоры

$$k_p = 1 - \frac{\omega_0^2 \alpha^2}{2b^2 (\alpha^2 + 2\alpha b + 2b^2)};$$

$$T_p \left(\frac{1}{b} - T_p \right) = \frac{\alpha + b}{b(\alpha^2 + 2\alpha b + 2b^2)}.$$

Таким образом, оптимальная работа опорной системы, служащей, например, для гашения вибрации узкополосного спектра, может быть осуществлена с помощью регуляторов расхода рабочего тела типа «соплослонка» или золотникового типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самсонов В.Н., Токарев И.П. Выбор разгрузочного устройства для испытаний летательных аппаратов и двигателей // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев: КуАИ, 1979.
2. Богачева А.В. Пневматические элементы систем автоматического управления. М.: Машиностроение, 1966.
3. Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973.
4. Лондих П.А., Елисеев С.В. К динамике элементов активной цепи пневматической виброзащитной системы // Вибрационная защита и надежность приборов, машин и механизмов. Иркутск, 1973.
5. Гриффин, Ричардсон, Яманами. Исследо-

- вание демпфирующего эффекта сжатой жидкостной пленки /Труды Американского общества инженеров-механиков. М.: Мир.1965. №3.
6. *Чегодаев Д.Е., Мулюкин О.П., Колтыгин Е.Б.* Конструирование рабочих органов машин и оборудования из упругопопористого материала МР. Самара: НТЦ «Авиа-тор», 1994.
7. *Ньютон Д.К., Гулд Л.А., Кайзер Д.Ф.* Теория линейных следящих систем. М.: Физматгиз, 1961.
8. *Богомолов А.И., Степанов П.А.* Определение оптимальных передаточных функций систем амортизации // Известия высших учебных заведений. 1979. №7.

METHODS AND MEANS OF CONTROLLING ACTIVE SUPPORT CHARACTERISTICS

© 2000 V.N. Samsonov , V.B. Balyakin

Samara State Aerospace University

Methods and means of controlling active supports characteristics with the help of consumption regulators are described in this paper. Support operation has been studied with gas and liquid film for various types of flow. The influence of control systems parameters on the dynamic characteristics of various supports has been investigated. The method for the selection of the optimal regulator of the active support with the predetermined type of vibration generator has been demonstrated.