


## КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОТКРЫТЫМИ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

©1999 В.А. Виттих

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара



Концепция управления открытыми системами разработана применительно к организациям – сложным системам, имеющим искусственное происхождение, в которых люди и технологии объединены в целесообразное целое. В отличие от широко распространенных жестких иерархических структур с командно – подчиненными отношениями в предлагаемой концепции организации уподобляются живым организмам, развивающимся и эволюционирующим в более сложные и жизнеспособные системы. Движущей силой этой эволюции являются процессы управления, осуществляемые людьми, принимающими решения. Управление рассматривается как функция сложных систем, направленная на упорядочение, сохранение целостности системы, ее организации. В содержание понятия “управление” при этом включаются процессы самоорганизации, где управление является необходимым внутренним свойством системы. Условием устойчивого развития сложной системы – организации является согласованность принимаемых решений, которая достигается путем интеграции знаний, выполняющей фундаментальную системообразующую функцию.

**1. Проблемы реформирования организации и управления**

В нашей стране проводятся фундаментальные политические и экономические реформы, однако *принципы организации и управления* в органах государственного и муниципального управления, на промышленных предприятиях, в агропромышленном комплексе и во многих других учреждениях чаще всего *остаются неизменными - бюрократическими*. В начале XX века, после того как Макс Вебер обосновал преимущества “идеальной бюрократии”, такая форма менеджмента быстро распространилась по всему миру и долгое время считалась наиболее эффективной, поскольку опиралась на жесткую иерархию власти, разделение труда на основе функциональной специализации, регламентацию процедур, определяющих порядок действий во всех ситуациях, встречающихся в процессе функционирования организации, и т.п. [1].

Тем не менее, в конце 50-х - начале 60-х годов все чаще и чаще стали отмечаться негативные последствия бюрократических подходов к организации и управлению. “Бюрократические структуры проектируются для того, чтобы выполнять действия, которые

поддаются программированию в стабильных, предсказуемых окружающих условиях. Однако окружающие условия становятся все более неустойчивыми и быстро изменяющимися. В настоящее время возникла потребность в организациях такого типа, которые позволили бы быстро приспосабливаться к изменяющимся условиям; необходимо искать такие структуры, с помощью которых люди могут организовываться для новаторской непрограммируемой деятельности” [2].

Таким образом, потребность в реформировании организаций в направлении гибкого управления, позволяющего оперативно реагировать на случайные флуктуации окружающей среды - рынка, была осознана довольно давно. Несмотря на это, сегодня не только в России, в которой рыночные отношения находятся в стадии становления, но и в странах с развитой рыночной экономикой, в частности, в США доминируют жесткие бюрократические принципы организации и управления. И это “*торжество*” *бюрократии отрицательно сказывается на экономике*, в чем можно убедиться, кратко рассмотрев, например, некоторые показатели и тенденции развития промышленности США.

*Конкурентоспособность промышленно-*

сти США неуклонно снижалась в 70-е - 80-е годы. В 1969 году компании США произвели 82% телевизоров, 88% автомобилей и 90% станков, реализованных на американском рынке. В 1983 году в магазинах США едва ли можно было найти американский телевизионный приемник. В страну ввозилось также 30% потребляемых автомобилей и 50% станков. Даже в таких новых, наукоемких отраслях, как, например, производство полупроводников, доля США в мировом производстве упала с 85% в 1980 году до 15% в 1988 году [3].

Все 80-е годы в США прошли под знаком крупных реорганизаций и реформ в управлении, получивших броское название “тихой революции в американском менеджменте” [4]. Этому способствовал выход в свет в 1982 году книги американских специалистов Т. Питерса и Р. Уотермена “В поисках эффективного управления” (в 1986 году она была переведена на русский язык), в которой был проанализирован опыт наиболее преуспевающих компаний США. Несмотря на это, американский бизнес продолжал терять свои позиции перед натиском японских и западно-европейских фирм. Спустя пять лет после выхода своей знаменитой книги Т. Питерс вынужден был признать, что в США попросту нет компаний с высокоэффективным управлением.

Именно этим обстоятельством и объясняются неудачи компаний США в конкурентной борьбе. В конце 80-х годов выяснилось, что на расположенных в США предприятиях японских фирм уровень производительности труда в среднем на 20 - 25% выше, чем на американских предприятиях аналогичного профиля. При этом и качество, и привлекательность продукции японских фирм были куда выше американских. Традиционные объяснения успехов японцев, вроде национально - исторических особенностей японского народа, культурного фактора и т.д., уже не срабатывали. На расположенных в США японских предприятиях применялся труд американских рабочих, специалистов и управляющих. Субподрядчиками были тоже американские фирмы, культурная среда - исключительно американская, а результаты хозяй-

ственной деятельности - разными [4].

Американскому бизнесу не помогли и массивные инвестиционные инъекции в самые современные средства автоматизации производства и конторского труда. *Объем капиталовложений, масштабы технического перевооружения производства в конце 80-х годов уже утратили свою былую роль для повышения конкурентоспособности.* Так, с 1973 по 1986 год темпы роста производительности труда в японской экономике были в 6 раз выше, чем в США. Однако, согласно результатам большинства американских исследователей, не более 20% различий в динамике эффективности производства между этими двумя странами можно отнести за счет размеров капиталовложений в техническую модернизацию производства. *Главная причина происходящего состояла в том, что, несмотря на изменения в хозяйственных стратегиях, в инвестиционных приоритетах, американский бизнес не изменил системы и методы управления, не привел их в соответствие с теми требованиями, которые сегодня предъявляются к производству.* *Гибкость в управлении становится куда более важной, чем “рациональность” управления во всех ее бюрократических формах - от достижения упорядоченности, подконтрольности, соответствия инструкциям, типовым формам до экономии на управленческих расходах [4].*

*Гибкость организации и управления достигается на основе их реформирования в следующих направлениях.*

Прежде всего, путем перехода от *иерархических структур к сетевым, гетерархическим [5]*, а применительно к промышленным предприятиям - к *голоническим производственным системам (ГПС)*, сочетающим стабильность иерархии с гибкостью гетерархии [6,7]. ГПС состоят из голонов, каждый из которых является автономным “строительным блоком” системы, способным к самообучению и адаптации без поддержки извне. Механизмы взаимодействия голонов обеспечивают возможность динамической переконфигурации (самоорганизации) ГПС в ответ на флуктуации среды - изменяющиеся условия рынка. В отличие от традиционных производственных систем с иерархическими свя-

зьями и командно - подчиненными отношениями, ГПС строятся на основе использования отношения “часть - целое” и принципа “равный с равным” при обмене информацией и физическими компонентами.

Обеспечение гибкого управления требует повышения роли *децентрализованного принятия решений* и широкого распределения полномочий по всей организации [8]. Некоторые стратегические решения, касающиеся перспектив развития организации, могут приниматься централизованно, а оперативные (тактические) решения должны приниматься децентрализованно. В условиях возрастающего числа лиц, принимающих решения, необходимо решить проблему установления четких границ ответственности между ними.

*Гибкое планирование* предполагает изменение взглядов на план: в отличие от традиционного плана - программы, жестко управляющего действиями исполнителей, он должен рассматриваться как план - коммуникация, то есть как некоторый информационный ресурс, который используется при принятии решения о том, что нужно делать [9,10]. При этом допускается возможность альтернативной интерпретации выбора действий в рамках плана.

Требование *самоуправления* связано с предоставлением сотрудникам организации возможности определять свои собственные задачи и планы, а также регулировать свою индивидуальную рабочую нагрузку. Предполагается, что при этом должна повыситься ответственность сотрудников за свои действия (при условии, что высшие руководители вторгаются в их деятельность только по мере необходимости) [11].

Можно было бы отметить еще целый ряд задач, которые требуют решения на пути к достижению гибкости организации и управления (например, разработка адекватной системы материального стимулирования труда сотрудников). Однако в этом нет необходимости, поскольку и без того ясно, что идеи гибкости (или самоорганизации) чрезвычайно редко реализуются на практике, где продолжают доминировать иерархические структуры, централизованное принятие ре-

шений, жесткое планирование и т.п. Одна из причин, препятствующих проникновению в реальные системы изложенных выше нововведений в области организации и управления, известна - это человеческий фактор. Люди всегда настороженно относятся к любым переменам, а в бюрократических организациях особенно, поскольку они постепенно трансформируются в функционеров, работающих по принципу “как бы чего не вышло”. Однако дело не только в этом. Имеются и другие сдерживающие факторы, к числу которых относится традиционный (бюрократический) подход к использованию вычислительной техники.

*Роль компьютеров в управлении* бюрократическими организациями является вспомогательной, подчиненной и сводится обычно к сбору, хранению, обработке данных и удобному их представлению пользователям. Бюрократия долгое время существовала и могла бы продолжать существовать без компьютеров. Однако огромные потоки данных, захлестнувшие сферу менеджмента, потребовали применения средств автоматизации, которые незамедлительно стали впитывать в себя идеи бюрократии, что привело (по выражению Д.Д. Хэмптона) к “бюрократической модели управления данными в организациях” [11].

Поначалу наметился известный прогресс в управлении, но очень скоро стал сказываться “эффект насыщения”: капиталовложения в компьютерную технику увеличивались, а эффективность функционирования организаций в целом изменялась незначительно. Обратив внимание на этот факт, один из руководителей “Дженерал моторс” констатировал, что за те 33 миллиарда долларов, которые его компания израсходовала в течение шести лет (речь шла о 80-х годах) на разного рода средства автоматизации и компьютеризации, она просто могла бы купить и “Тойёту”, и “Хонду” - двух своих иностранных конкурентов на авторынке США, - вместе взятых [4]. Стало ясно, что начали сказываться ограниченные возможности самой бюрократической системы со всеми ее недостатками.

Однако попытки реформирования организации и управления, как уже отмечалось

выше, не дали желаемых результатов, и не только из-за “человеческого фактора”, а также потому, что бюрократия укрепилась с помощью компьютерных систем, построенных на ее основе. Расшатать ее оказалось куда более трудным делом, поскольку, наряду с необходимостью обучения, изменения психологии и мотивации людей, требовалась дополнительная переработка методического, программного и технического обеспечения компьютерных систем.

Например, гибкое планирование предусматривает постоянную работу с планами, которые, с одной стороны, должны быть всегда “под рукой”, а с другой - допускать возможность их оперативной коррекции и согласования с коллегами, зачастую удаленными на значительные расстояния. Для этого в компьютерных сетях планы должны быть представлены в электронной форме, поскольку “бумажная технология” здесь оказывается неприемлемой. Но тогда потребуются как изменение организации работы с планами, так и необходимость разработки дополнительных программных средств, скажем, программ, которые предотвращают возможность несанкционированного доступа к планам.

Если же ставится задача децентрализованного принятия решений, то для этого необходимо обеспечить всем лицам, принимающим решения, доступ к компьютерной сети ограничений, в условиях которых эти решения принимаются. Опять же, реорганизация управления в этом случае напрямую связана с преобразованиями компьютерной сети и разработкой соответствующих программных средств. Иными словами, *реформирование организации и управления должно осуществляться параллельно и согласованно с разработкой компьютерной системы, которая становится неотъемлемой, “встроенной” частью организации.*

Все перечисленные (а также и многие другие) проблемы преобразования традиционных “жестких” структур в новые “гибкие” формы организации и управления, в конечном счете, отражают изменение взглядов на мир: классическое причинно – механическое воззрение на мир, лежащее в основе бюрократии, начинает постепенно вытесняться но-

выми представлениями о мире, открывающими возможность освоения сложных самоорганизующихся открытых систем. Поэтому кратко рассмотрим историю развития этих взглядов.

## **2. Изменение научной картины мира и методологии исследований**

*В классическом естествознании, начиная с XVII века, проходит идея, согласно которой объективность и предметность научного знания достигается только тогда, когда из описания и объяснения исключается все, что относится к субъекту и к процедурам его познавательной деятельности. Идеалом было построение абсолютно истинной картины природы, знания о которой сводились к фундаментальным принципам и представлениям механики. Познающий разум наделялся статусом суверенности и трактовался как дистанцированный от вещей, как бы со стороны наблюдающий и исследующий их. Изучаемые объекты рассматривались преимущественно как малые системы (механические устройства), характеризующиеся относительно небольшим количеством элементов, их силовыми взаимодействиями и жестко детерминированными связями. Для их изучения достаточно было понять, что свойства целого полностью определяются состояниями и свойствами его частей [12].*

Основоположник классического естествознания И. Ньютон, не сомневавшийся в универсальном характере законов, изложенных в его “Математических началах натуральной философии”, в глазах научной общественности был человеком, впервые открывшим язык, на котором говорит (и которому подчиняется) природа. Триумф ньютоновства, непрерывное расширение сферы научных исследований на все новые и новые области позволило распространить ньютоновское мышление до настоящего времени. “Мы так привыкли к законам классической динамики, которые преподаются нам едва ли не с младших классов школы, что плохо сознаем всю смелость лежащих в их основе допущений” [13].

Что же касается сложных систем, то классическое естествознание практически мало

пригодно для их изучения, и многих исследователей подстерегало на этом пути разочарование.

*Неклассическое естествознание*, зародившееся в конце XIX – начале XX века, допускает *истинность нескольких* отличающихся друг от друга конкретных теоретических описаний одной и той же реальности, поскольку в каждом из них может содержаться момент объективно – истинного знания. При этом принимаются такие типы объяснения и описания, которые в явном виде содержат *ссылки на средства и операции познавательной деятельности*. Так, например, в квантово – релятивистской физике в качестве необходимого условия объективности объяснения и описания выдвигается требование четкой фиксации особенностей средств наблюдения, которые взаимодействуют с объектом.

Идея исторической изменчивости научного знания соединилась с новыми представлениями об *активности субъекта познания*, который рассматривался уже не как дистанцированный от изучаемого мира, а как *находящийся внутри его*, детерминированный им. Возникает понимание того, что *ответы природы на наши вопросы определяются не только устройством самой природы, но и способом нашей постановки вопросов*, который зависит от исторического развития средств и методов познавательной деятельности. Представление о соотношении части и целого применительно к сложным системам включают идеи несводимости состояния целого к сумме состояний его частей. [12].

Более глубоко и рельефно граница между классическим и неклассическим естествознанием проведена в работе [13]. В отличие от классической физики, рассматривающей явления природы с позиций *детерминизма, обратимости и равновесия*, излагается прямо противоположная точка зрения: окружающий нас мир характеризуют *случайность, необратимость и неравновесность*. Флуктуации в случае неравновесных процессов могут определять глобальный исход эволюции системы, а поэтому пренебрегать ими принципиально невозможно. Что касается необратимых и неравновесных процессов, то они

свойственны любой сложной системе, а обратимость и равновесие, наоборот, – редкие, исключительные явления.

Такое видение мира, на первый взгляд, ассоциируется с беспорядком, хаосом. Однако в работе [13] показано, что *порядок, равновесие и устойчивость системы достигаются постоянными динамическими неравновесными процессами*. Иными словами, необратимость и неравновесность создают порядок из хаоса. Вдали от равновесия в результате *самоорганизации* могут возникать новые динамические состояния материи, отражающие взаимодействие данной системы с окружающей средой. Эти новые структуры названы автором цитируемой монографии И. Пригожиным *диссипативными структурами*, поскольку их стабильность покоится на диссипации энергии и вещества. Исходя из этого, дано новое определение *структуры* как формы адаптации системы к внешним условиям.

*Эволюционная парадигма* И. Пригожина охватывает изолированные (замкнутые) системы, эволюционирующие к хаосу, и *открытые системы*, эволюционирующие к все более высоким формам сложности. Мир динамики, классической или квантовой, – мир обратимый. И. Пригожин показывает, что в таком мире эволюция невозможна. При этом он пишет, что “информация, представимая в динамических структурных единицах (или проще – информация, извлекаемая из динамики), остается постоянной во времени”. Это высказывание может быть интерпретировано следующим образом.

Уравнения классической динамики, описывающие замкнутые системы, содержат в себе информацию о поведении системы на всей временной оси. Вид этих уравнений не изменяется во времени. Сложные открытые самоорганизующиеся системы (в отличие от замкнутых), эволюционирующие во времени, требуют для своего описания постоянного обновления информации. Поэтому к моделированию сложных явлений необходимо относиться с осторожностью: в сложных системах дефиниции (определения) самих сущностей и взаимодействия между ними в процессе эволюции могут претерпевать измене-

ния [13].

Наряду с трансформацией взглядов на мир, *изменяется и методология научного поиска*. Как известно, в научных исследованиях используются два подхода к построению теорий - феноменологический (описательный) и объяснительный. Традиционная трактовка описания и объяснения противопоставляет их как ответы на вопросы “как” и “почему?”. Феноменологическая теория отвлекается от раскрытия внутренних причин, внутреннего механизма, внутренней сущности и ограничивается изучением внешних сторон явлений, их поведения. Объяснительная дает все то, от чего отвлекается феноменологическая [14]. “Под феноменологической теорией понимают такую формулировку закономерностей в области наблюдаемых физических явлений, в которой не делается попытки свести описываемые связи к лежащим в их основе общим законам природы, через которые они могли бы быть понятыми” [15].

Феноменологический подход заключается в теоретическом *описании непосредственно данных в опыте явлений*, то есть описании при помощи законов, в которых фигурируют только понятия и величины, имеющие эмпирическое значение, что позволяет непосредственно проверять их опытом. Иными словами, этот подход состоит в описании явлений такими, какими они даны в нашем опыте, а не такими, какими они существуют “сами по себе”, независимо от условий эксперимента [16].

Объяснительный подход заключается в том, чтобы на основании данных опыта и, если есть такая возможность, исходя из точного теоретического описания данного класса явлений, построить гипотезу о *внутренней структуре изучаемых объектов и внутреннем механизме соответствующих процессов*, то есть в описании явлений “самих по себе”, при помощи законов, понятий и величин, не имеющих непосредственно эмпирического смысла, но могущих быть проверенными косвенно в эксперименте путем проверки следствий данной гипотезы. При этом если между следствиями гипотезы и данными опыта будет достаточно хорошее совпадение, то гипотеза превращается в теорию

[16]. Автор работы [16] называет такую теорию ноуменологической.

Ноуменологическому (объяснительному) подходу чаще всего отдается предпочтение, поскольку он позволяет более глубоко понять сущность исследуемых явлений и процессов. Однако при его использовании для исследований сложных систем возникает известное противоречие: вынужденное разбиение сложной системы на части и детальное изучение каждой части в отдельности не позволяет с достаточной степенью достоверности судить о свойствах и поведении системы в целом. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность применения при исследовании сложных систем феноменологического подхода, который является мощным средством вскрытия объективных закономерностей в физике [16].

*Эмпирический базис*. Феноменологический метод исследований опирается на результаты опыта - данные наблюдений, которые содержат не только информацию об изучаемых явлениях, но и, как правило, включают ошибки наблюдателя, влияние внешних возмущающих воздействий, ошибки приборов и различные субъективные наслоения. Поэтому данные наблюдений должны быть преобразованы в *эмпирические факты*, которые в значительной степени свободны от указанных недостатков [17]. Эмпирические факты содержат как верифицированную информацию, с целью приобретения которой и проводились эксперименты, так и сведения о внешних условиях, об используемых методах и средствах измерений. Поскольку факты получаются благодаря интеграции или обобщению данных наблюдений, то их можно отнести к разряду знаний. Совокупность эмпирических фактов, полученных при исследованиях объекта или системы, образует *эмпирический базис*.

Эмпирический факт в сложной системе целесообразно трактовать как “ситуацию”, “случай”, “положение” (“case” в английской терминологии), хотя бы потому, что там присутствует деятельность людей. Фиксируется именно ситуация: “в таком - то месте, в такое - то время, при таких - то условиях имел место такой - то случай”. Тогда эмпирический

базис будет составлять множество ситуаций, каждая из которых несет в себе какой-то запас знаний о системе. Эти знания представляют ценность “сами по себе”, но они же могут использоваться для приобретения новых знаний о состоянии сложной системы. Иными словами, можно развивать ситуационный подход к исследованию сложных систем.

*Ситуационные исследования* (case studies) явились результатом изменения взглядов на непрерывный, поступательный характер развития науки, который доминировал в XIX веке и в начале XX века. Научные парадигмы, теории не могут выводиться непосредственно из предшествующего знания, они несоизмеримы и разделены пропастью научных революций. Поэтому в работах по ситуационным исследованиям, которые начали развиваться в 70-е годы применительно к истории науки, прежде всего, подчеркивается необходимость остановить внимание на отдельном событии, которое произошло в определенном месте и в определенное время. Ситуационные исследования - это как - бы перекресток всех возможных анализов науки, сфокусированных в одной точке с целью обрисовать, реконструировать одно событие из истории науки в его цельности, уникальности и невоспроизводимости [18].

В ситуационных исследованиях ставится задача понять прошлое событие не как вписывающееся в единый ряд развития, не как обладающее какими-то общими с другими событиями чертами, а как неповторимое, невоспроизводимое в других условиях. В исторических работах прежнего типа историк стремился изучить как можно больше фактов с тем, чтобы обнаружить в них нечто общее и на этом основании вывести общие закономерности развития. Теперь историк изучает факт как событие, событие многих особенностей развития науки, сходящихся в одной точке с тем, чтобы отличить её от других [18].

Недостаток такого рода исследований заключается во фрагментарности результатов: не создается общей целостной картины, отсутствуют способы интеграции полученных находок, трудно бывает уловить, какие же общие положения рождаются на базе проде-

ланной работы. Ситуационные исследования надо проводить, исходя из какой-то общей схемы, должен быть разработан понятийный аппарат, пригодный для изучения любого конкретного эпизода. Это - онтология сложной системы.

Особенностью ситуационных исследований является то, что берутся для изучения локальные, фокусные точки, в которых могут быть обнаружены (в результате определенного анализа) всеобщие характеристики того или иного периода (имеется в виду история науки). Однако на практике такой анализ проводить довольно трудно, обычно даже задачи такой не ставится. Отсюда возникает ощущение чрезвычайной фрагментарности ситуационных исследований: изучаются эмпирически отдельные конкретные ситуации, обладающие лишь частным значением. Даже если средствами ситуационных исследований будет изучено, например, максимально большое количество исторических событий, то возможно ли перейти к обнаружению всеобщности в истории? Ведь каждая ситуация будет реконструирована как неповторимая, невоспроизводимая в других условиях.

Поэтому необходимо поставить задачу *выработки принципов*, руководствуясь которыми можно было бы *выявить всеобщее в истории через изучение уникальных, особенных событий*. Для этого элементарное событие не приобщается к некоторому всеобщему, находящемуся вне его, а наоборот, это *всеобщее обнаруживается в нем самом и через общение с другим особенным событием*. В теории, в логике истории на передний план выдвигается *общение, вместо обобщения*.

Иными словами, должна быть решена *задача выявления всеобщего в частном, конкретном эпизоде* [18]. Прежние логические средства не годятся - *нельзя разрушить то, что не подчиняется логике*, пусть даже совершенной последней теории. Разговор надо вести на равных, признавая право оппонента на существование. *Между событиями устанавливаются диалогические отношения*.

Аналогичный тип общения устанавливается и между теми конкурирующими теориями, которые сосуществуют во времени. Поэтому все чаще подчеркивается *момент*

именно сосуществования разных теорий, парадигм [18].

При ситуационных исследованиях необходимо на основе изучения уникальных эмпирических фактов и их сопоставления с другими фактами установить нечто всеобщее, закономерное в сложной системе. В отличие от классических методов исследований, где процедура обобщения применяется к однородной генеральной совокупности (например, к ряду измерений какой-либо физической величины), здесь приходится иметь дело с разнородными, на первый взгляд несовместимыми событиями. Поэтому формальные индуктивные или дедуктивные выводы могут оказаться в принципе неприемлемыми.

Тем не менее, решение задачи возможно, если к поиску закономерности в уникальных фактах подключить *специалистов - экспертов*, которые, с одной стороны, будут использовать свой собственный опыт, а с другой - приобретать новые знания в результате диалогового взаимодействия со своими коллегами. Тогда в этих знаниях будет появляться субъективная составляющая, а это, как принято считать в классической науке, недопустимо. Однако традиционный редукционистский подход при всей своей строгости не дает конструктивных результатов. Поэтому, изучая сложные системы, может быть не нужно стремиться к “абсолютной объективности”? Какая-то доля субъективизма принципиально должна присутствовать в результатах ситуационных исследований, поскольку человек является составной частью изучаемых сложных систем.

Иными словами, ситуационные исследования должны опираться на знания специалистов - экспертов и на специальные методы и средства исследований, которые необходимо разработать.

### 3. Организация, управление и среда деятельности

После выхода в свет монографии А.А. Богданова [19] (первоначально опубликованной в 1913 году) значительно повысился интерес к научным исследованиям в области теории организации как науки об общих законах, по которым происходит организация

элементов системы в функциональное целое. Внимание, таким образом, стало концентрироваться не столько на функционировании той или иной системы, сколько на принципах образования целесообразного единства, организации; не случайно А.А. Богданов назвал свою науку тектологией: от греческого *tecton* - строить [20]. Его точка зрения была близка диалектике Гегеля, который, желая установить универсальный метод развития Вселенной, понимал под “развитием” метод или путь организации всевозможных систем [21].

Установление принципов организации является важной проблемой и при исследованиях широкого класса сложных систем, объединяющих людей и разнообразные технологии, например, производственных систем. Подобные искусственные системы-артефакты (от латинского *arte* - искусственный и *factus* - сделанный) отличаются от систем, организованных самой Природой и являющихся предметом исследований естественных наук. Герберт Саймон [22], подчеркивая это различие, обосновал необходимость создания специальных наук - наук об искусственном. Тогда разработку теории организации сложных систем - артефактов можно считать научным направлением, возникшим “на стыке” наук об искусственном и “всеобщей организационной науки” (как ее называл А.А. Богданов).

Сложные системы-артефакты, которые будут рассматриваться в дальнейшем (производственные, муниципальные, банковские, транспортные и другие), будем называть *организациями*, поскольку в них люди и технологии объединяются в целесообразное целое. Тогда термин “организация” будет употребляться в двух смыслах: как объединение людей и техники (предприятие, учреждение) и как синоним понятий “развитие”, “строительство”. Однако недоразумений быть не должно, поскольку значение этого термина легко определяется из контекста.

Организации являются открытыми системами, обменивающимися с окружающей средой веществом, энергией и информацией (именно так они трактуются в тектологии А.А. Богданова). Важнейшим свойством лю-



бой открытой системы является самоорганизация, то есть способность системы обретать какую-то пространственную, временную или функциональную структуру без специфического воздействия на нее (под специфическим внешним воздействием понимается такое, которое навязывает системе структуру или функционирование) [23].

Все живые существа обретают форму и функции с помощью самоорганизации; самоорганизация происходит и в неорганическом мире, изучением которого занимается физика и химия [23]. Одними из первых обратили внимание на то, что и организационные системы способны к самоорганизации, авторы монографии [1], в которой, в частности, отмечается, что “большая часть сознательной деятельности человека приводит к образованию систем из хаоса” и что для открытых систем, организуемых человеком, характерно “динамическое равновесие”.

*Самоорганизующаяся система* в состоянии реорганизовать свои внутренние ограничения, а не просто приспособляться к потоку возмущений, идущему из внешней среды. Самоорганизация выражается в новых устойчивых состояниях, которые более стойки к возмущениям, чем предыдущие. И если *самостабилизирующиеся системы выживают* в средах, в которых возмущения находятся в пределах диапазона их корректирующих воздействий, то *самоорганизующиеся системы эволюционируют* в более сложные и более жизнеспособные системы [24].

Подобные развивающиеся системы являются в принципе *незавершенными*. Поэтому любая организация, представляющая собой сложную открытую систему, находится в состоянии постоянного “строительства”, преобразований, а не “застывает” как окостеневшая структура. *Движущей силой эволюции* организации являются процессы управления, осуществляемые людьми, принимающими решения, поскольку именно *принятие решений* предполагает необходимость выполнения каких-нибудь *действий*, то есть проявления какой-либо энергии, *деятельности*.

Люди, которые решают, какие действия предпринимать, называются *актерами* [24]. Тогда “организацию” можно определить как

множество акторов, способных в рамках сформированной *среды деятельности* для достижения поставленных целей принимать решения автономно или в результате взаимодействия между собой. Среда деятельности представляет собой совокупность *методов и средств*, обеспечивающих актерам следующие возможности:

- анализировать состояние окружающей среды;
- взаимодействовать между собой;
- решать задачи, необходимые для принятия решений;
- оценивать эффективность принимаемых решений.

Однако, наблюдая и фиксируя чисто феноменологически наличие эволюции и самоорганизации в открытых системах, следует признать, что механизмы их организации до сих пор не раскрыты. В частности, недостаточно исследован вопрос о *системообразующих факторах*, благодаря которым *организация*, объединяющая людей с различными интересами и специальностями, начинает вести себя как *целостный организм, обладающий устойчивостью*. Речь идет о факторах, которые играют такую же роль, какую выполняют, например, силы всемирного тяготения, обеспечивая устойчивость Солнечной системы. В то же время системообразующие факторы должны учитывать специфику искусственно организуемых систем, которая заключается в наличии у них определенных целей (как известно, И. Кант называл понятие цели “чужаком в естествознании”).

С этой точки зрения *организации* являются целеустремленными системами, которые (в отличие от целенаправленных систем, ведущих себя как запрограммированные роботы) изобретательны и динамичны, поскольку их цели и способ выбора целей меняются со временем [24].

*Цели*, безусловно, выполняют определенную системообразующую функцию, однако их наличие является необходимым условием, но недостаточным, поскольку цели достигаются посредством процессов управления.

*Управление* является функцией сложных систем, непосредственно направленной на

упорядочение, сохранение и повышение *целостности системы, ее организации* [25]. В содержание понятия “управление” при этом включаются процессы *самоорганизации*, где управление является необходимым *внутренним свойством* системы. Следует отметить, что такой взгляд на управление отличается от традиционно используемого, при котором разделяются управляемая система и управляющий субъект, а управление оказывается внешним по отношению к системе фактором [26].

*Процессы управления* в организациях осуществляются *совокупной деятельностью акторов*, порождающей как ожидаемые, так и непредсказуемые результаты. Несогласованные, противоречащие друг другу решения акторов, и, как следствие, их несогласованные действия ведут к истощению ресурсов организации, что исключает ее *устойчивое развитие*. Согласованные решения и действия, наоборот, создают основу устойчивости организации. Иными словами, устойчивость связывается с *эффективностью взаимодействия людей-акторов* в процессах принятия решений. Человек существует в организациях не в отдельных актах события с людьми и вещами (технологиями), а в последовательностях, рядах, *переплетениях таких актов*. Ему постепенно приходится переходить от отдельных взаимодействий к их сцеплениям и цепочкам, а, следовательно, менять свои познавательные позиции, средства и инструменты.

*Моделирование процессов управления* с целью оценки возможных последствий принимаемых решений в рамках открытой гетерархической модели среды деятельности представляет собой сложную проблему, поскольку до сих пор не изучены механизмы принятия решений человеком, не говоря уже о коллективном выборе. Формальные модели здесь построить принципиально невозможно. Остается только один путь: полунаатурное “человеко-машинное” моделирование, когда реальные акторы отрабатывают свои решения в рамках компьютерной модели среды деятельности, которая выступает в роли своеобразного “интеллектуального тренажера”. Результаты такого моделирования, есте-

ственно, будут напрямую зависеть от особенностей конкретного актора. Поэтому процесс моделирования целесообразно повторять многократно, изменяя состав акторов (при прочих равных ограничениях и условиях).

*Модели среды деятельности* в зависимости от используемых методов и средств могут быть сформированы различным образом. Бюрократическая модель, например, не имеет развитых средств анализа состояния окружающей среды, поскольку исходит из предположения, что окружающие условия стабильны и хорошо предсказуемы. Взаимодействия между акторами в ней упорядочены жесткой иерархией власти, и большинство решений принимается некоторым “главным актором”. Разделение труда на основе узкой функциональной специализации приводит к тому, что многие задачи решаются, исходя из интересов данного структурного подразделения, а не организации в целом. И, наконец, оценка эффективности принимаемых решений осуществляется обычно на основе принципа каузальности, согласно которому каждое явление имеет причину и одновременно есть причина другого явления; однако такие причинно - следственные цепочки чрезвычайно редко встречаются на практике.

Альтернативной закрытой иерархической (бюрократической) модели, не обладающей достаточной гибкостью, является *открытая гетерархическая модель среды деятельности*, создающая условия для самоорганизации. Такая модель включает в себя методы и средства изучения окружающей среды, а также взаимодействия акторов с использованием принципов “каждый с каждым” и “равный с равным”. Среда деятельности имеет гибкую структуру, позволяющую акторам для достижения своих целей организовываться во временные рабочие группы (команды), в том числе во временные иерархии, для решения междисциплинарных задач.

Следует отметить, что на практике иерархические или гетерархические, закрытые или открытые среды деятельности не реализуются “в чистом виде”. Несмотря на ограничения бюрократической системы (а чаще всего вопреки ей), акторы взаимодействуют напрямую, если того требуют инте-

рессы дела, и, наоборот, в гетерархических средах они могут образовывать иерархические структуры. Поэтому более корректно говорить о “*модели среды деятельности*”, которую планируется сформировать, а не о “среде деятельности”, потому что реально получится что-то несколько иное, поскольку люди не всегда следуют данным им предписаниям. Если же еще дополнительно учесть, что открытые гетерархические среды не могут быть реализованы без компьютеров в принципе, то правомерно ввести понятие “компьютерной модели среды деятельности”. Однако именно потому, что компьютеры становятся неотъемлемой составной частью среды, можно пользоваться термином “модель среды деятельности”, подразумевая присутствие в ней компьютерных средств.

#### 4. Онтология организации

Широко известный тезис “Все предметы и явления существуют в пространстве и времени” не принадлежит какой-либо конкретной науке, например, физике; он не может быть нарушен и действителен “во всех возможных мирах”. Всю совокупность подобных утверждений в философии называют онтологией. Онтология, таким образом, имеет дело с “всеобщими законами бытия”: общенаучными понятиями и формулируемыми для них “онтологическими” аксиомами [27].

Онтология занимается изучением категорий – философских понятий, являющихся средством выработки картины мира, способов освоения человеком различных объектов, норм понимания бытия вообще и человеческого бытия в частности. В древности категории служили для обозначения основных типов вещей, стихий, энергий. В дальнейшем стала более выявляться логическая функция категорий, их роль как понятий, характеризующих основные типы отношений между вещами. По мере развития форм человеческой деятельности категории все более обнаруживают свое значение обобщенных инструментов, в своей совокупности обеспечивающих воспроизводство культуры. Категории образуют своего рода “сеть”, в “узлах” которой пересекаются и связываются разные категории [28].

Онтология как бы надстраивается над всем философским и научным познанием, претендует на обобщение того и другого, на “гармонизацию” различных представлений бытия в системе категорий. Вопрос о взаимосвязи категорий всегда вызывал в философии весьма острые дискуссии: шла своего рода конкурентная борьба за создание наиболее совершенной системы категорий. Однако попытки построить такого рода систему не увенчались успехом [28].

Категориальный анализ – учение о категориях, исследующее природу и область применения категорий, считает число категорий очень большим, еще не выясненным. Он констатирует, что каждой области науки присущи свои категории и что лишь не многие из них выполняют всюду одинаковые функции [29]. Более того, можно говорить о категориальной динамике, если учесть, что многие понятия (например, “система”, “самоорганизация” и “структура”) со временем приобрели категориальный статус [28].

Отвлекаясь от философии и переходя к практическому применению онтологии, в том числе категориального анализа, необходимо отметить, что онтологические аксиомы чаще всего используются неявно. Решая те или иные задачи, человек обычно не задумывается об “онтологическом базисе”, предпочитая опираться на научные теории, обладающие относительной полнотой и непротиворечивостью, а главное, - возможностью получать дедуктивные выводы с помощью того или иного исчисления. Однако при изучении сложных систем-организаций на этом пути его чаще всего ожидают разочарования по причине невозможности построения целого на основе его частей. Тогда может быть целесообразно вернуться к онтологическим представлениям и попытаться на этом “более высоком” уровне решить проблему целостного, а не фрагментарного, описания организаций? Иными словами, необходимо рассмотреть онтологию сложных систем-организаций, но не с общефилософских позиций, а с точки зрения ее практического применения.

Интерес к онтологии в таком контексте появился в связи с работами в области со-

здания интеллектуальных систем, в которых осуществляется компьютерное представление и обработка знаний. И это не случайно, поскольку в таких системах онтологические понятия и аксиомы должны быть сформулированы в явном виде и сообщены компьютеру. Так, автор работы [27], говоря о трехступенчатой формализации языка физики, утверждает, что верхний уровень языка должны образовывать общенаучные понятия и сформулированные для них онтологические аксиомы. Категории Аристотеля использовались при разработках интеллектуальных систем для исследований технических объектов [30] и мультиагентных систем для моделирования процессов самоорганизации и кооперации [31]. Можно было бы указать и много других работ, в которых использован категориальный аппарат и онтологические аксиомы; но дело не в этом.

Важно то, что создание интеллектуальных систем (и прежде всего мультиагентных систем) стимулировало развитие работ в области онтологии организаций как самостоятельного направления исследований. Наиболее значимой явилась разработка онтологии предприятия (Enterprise Ontology), выполненной коллективом ученых и специалистов из ряда исследовательских учреждений и промышленных предприятий Великобритании [32]. Поскольку онтология предприятия (точнее, концепция ее построения) может быть положена в основу разработки онтологий организаций и другого типа, рассмотрим ее более подробно.

*Онтология предприятия* (ОП) – это некоторое описание (как формальная спецификация программы) понятий и отношений, которые могут существовать для любого агента или сообщества агентов. Основная цель создания ОП – *сделать возможным разделение (sharing) и повторное использование (reuse) знаний*. Практическое применение онтологии – это соглашение использовать разделенный словарь в согласованной и логичной манере. Агенты создаются таким образом, чтобы они могли использовать онтологии, а онтологии проектируются так, чтобы можно было разделять знания с этими агентами и среди них. Агент применяет он-

тологию, если его наблюдаемые действия совместимы с определениями в этой онтологии. При этом *использование онтологии является гарантией логичности, но не полноты*, по отношению к запросам и утверждениям, использующим словарь, определенный в этой онтологии [33].

Основное назначение онтологии [32] – действовать как средство коммуникации между:

- различными людьми, включая пользователей и разработчиков, занятых на разных предприятиях;
- людьми и разработанными вычислительными системами;
- различными разработанными вычислительными системами (включая модули набора инструментария предприятия, электронные таблицы и т.д.).

Кроме того, ОП предназначена для содействия:

- приобретению, представлению и манипулированию знаниями предприятия;
- структурированию и организации библиотек знаний;
- представлению логического обоснования, входов и выходов модулей набора инструментария предприятия.

И, наконец, онтология должна обеспечить *интероперабельность между несовместимыми инструментальными средствами* в среде моделирования предприятия, используя ОП как формат обмена.

В таблице 1, приведенной в приложении, представлены основные термины, определенные в неформальной онтологии предприятия.

Эти термины остаются в значительной степени неизменными, хотя имеется в виду, что ОП как единое целое будет эволюционировать и развиваться по мере надобности.

Следует отметить, что цель определений в любой онтологии отличается от определений в словаре. Последний сообщает, как используются слова, в то время как *определения онтологии обладают нормативной ролью*. Они определяют, как некоторое ограниченное множество терминов используется в отношении друг с другом.

Точность языковых конструкций в ОП

достигается использованием небольшого числа базовых “строительных блоков”, включая такие понятия, как “сущность”, “отношение”, “состояние дел” и “роль”. Все вместе они называются “мета - онтологией”, поскольку применяются для выражения определений в ОП.

Иными словами, онтология создает концептуальную основу для компьютерной интеграции знаний [10], которая достигается формализацией процессов преобразования определений естественного языка в Онтолингву - формальный язык, основанный на логике первого порядка, с встроенными возможностями, делающими удобным представление знаний в объектно-ориентированном стиле [32]. Онтологии, выраженные на этом языке, могут быть транслированы в многообразии других языков. Чем ближе эти языки к объектно-ориентированной схеме или Онтолингве, тем лучше будет трансляция.

Для того, чтобы оттенить специфику применения онтологий организаций в процессах принятия решений, рассмотрим сначала классический «аналитический» подход к решению этой проблемы (рис. 1). Суть его состоит в приобретении знаний и их использовании для решения задач в рамках конкрет-

ных предметных областей (ПО), полученных путем декомпозиции системы «на части». Принятие решений осуществляется в результате переговоров специалистов-предметников за «круглым столом». Однако отсутствие корреляции между различными ПО приводит к увеличению сроков и снижению эффективности принимаемых решений.

Применение онтологий, описывающих сложную систему в целом, призвано существенно повысить уровень согласованности решений, поскольку дает возможность получать междисциплинарные модели и выводы (рис. 2). Например, онтологии производственных систем открывают возможность реализации согласованной инженерной деятельности (concurrent engineering) за счет учета на стадии проектирования фактов всего жизненного цикла изделия (производственных факторов, особенностей сборки, испытаний и технического обслуживания) [7]. Важность онтологий признана при производстве полупроводников, проектировании самолетов, управлении процессами на предприятии, интеграции гетерогенных баз данных, планировании и т.д. [34].

Следует отметить некоторые особенно-

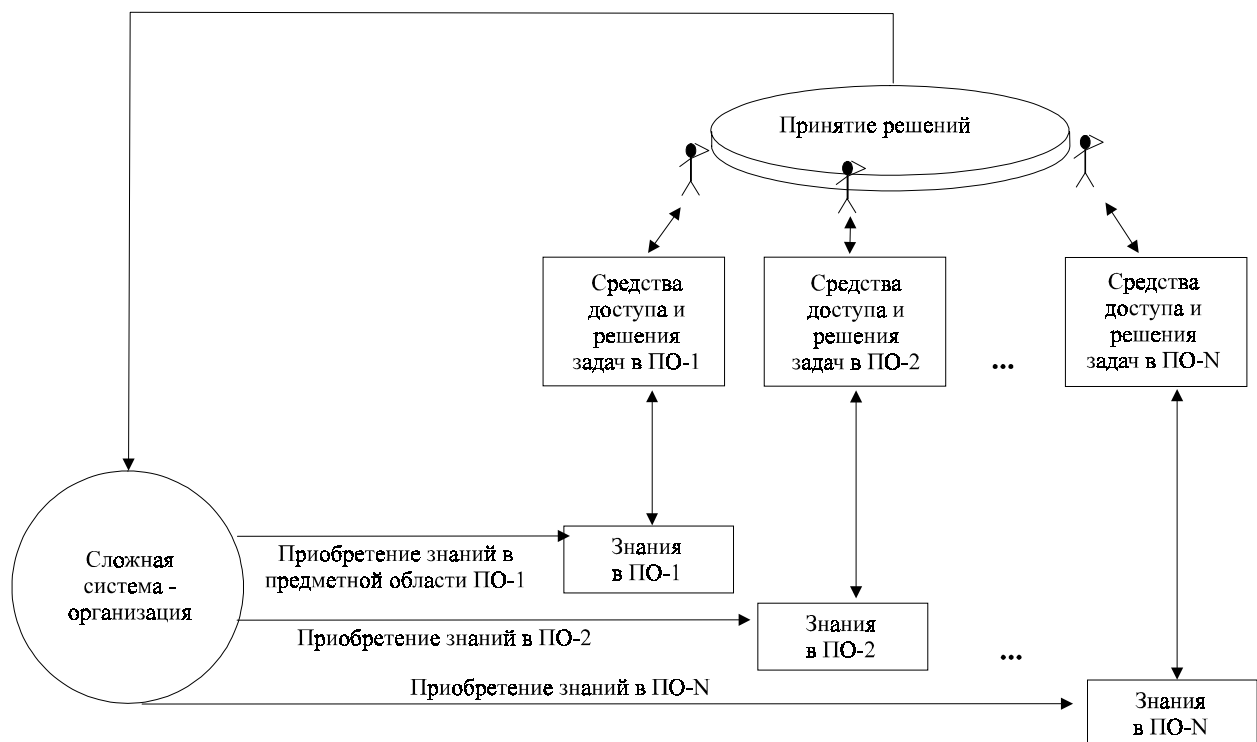


Рис. 1. Традиционный «аналитический» подход к исследованию сложных систем и принятию решений

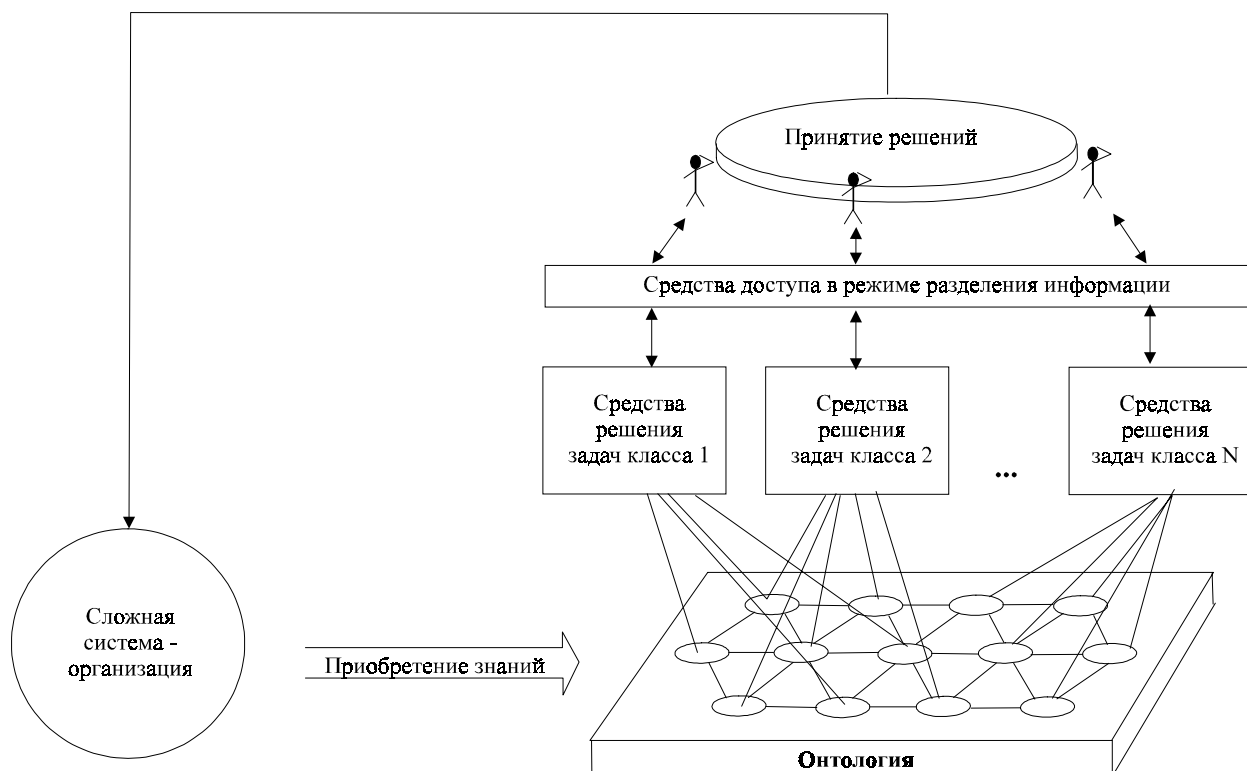


Рис. 2. Онтологический подход к исследованию сложных систем и принятию решений

сти применения онтологий при формализации решения междисциплинарных задач. Дело в том, что при решении таких задач используются знания из различных предметных областей, что затрудняет, а чаще всего просто не дает возможности, использовать формальные процедуры (исчисления) классических естественнонаучных и математических теорий. Поэтому повышается роль так называемых инженерных теорий [35, 36], которые позволяют автоматизировать процесс построения междисциплинарных компьютерных моделей с помощью специальных исчислений, базирующихся на знаниях [37].

Однако этим не исчерпывается перечень нетрадиционных методов и средств, связанных с применением онтологий в процессах принятия решений; к ним можно также отнести генетические алгоритмы, нечеткие логики, а также средства для создания и редактирования онтологий [34]. Набор подобных средств в организации должен быть спроектирован таким образом, чтобы облегчить интеграцию многочисленных независимо разработанных программных инструментов в единый пакет. Эта задача может решаться различными способами. В качестве примера

рассмотрим архитектуру набора инструментальных средств, предложенную в работе [32] и представленную на рис. 3.

Набор программных инструментов включает в себя следующие основные компоненты, обслуживающие одну или более задач:

- Инструментарий агента - для трансформации инструментов в агентов и регистрации этих агентов в Наборе инструментов;
- Компоновщик процедур - для генерирования моделей процессов и предоставления их в распоряжение Набора инструментов;
- Менеджер задач - для задействования моделей процессов и запуска приложений конечного пользователя.

Кроме того, есть возможности для редактирования и просмотра иерархии терминов Онтологии предприятия. Это можно сделать как из Компоновщика процедур, так и из Менеджера задач. Редактирование может потребоваться для включения дополнительных терминов.

Отдельные программные инструменты превращаются в агентов программистами путем добавления к инструментам уровней коммуникаций. Это может быть сделано с

помощью Инструментария агента. Все программные агенты должны уметь общаться с использованием формата обмена знаниями KIF и языка запросов и манипулирования знаниями KQML и предоставлять свои возможности в распоряжение Набора инструментов.

Программные средства, которые были преобразованы в агентов, могут быть зарегистрированы в Наборе инструментов предприятия Администратором набора инструментов. Эти агенты регистрируются формулировкой их типа (программа или личность) и их возможностей. Онтология гарантирует, что эти термины используются согласованно. Как только агент зарегистрирован, его возможности могут быть востребованы Менеджером задач для решения задач пользователя.

Процессы “захватываются” Экспертами по методам с использованием Компоновщика процедур. И снова это делается с применением Онтологии. Модели процессов (т.е. процедуры) могут быть загружены в Менеджер задач, где они могут быть выбраны в качестве задач и выполнены, запуская таким

образом процесс. Именно так процедуры используются в качестве основы для поддержки пользователей и для координации использования агентов.

Подробное описание Набора инструментов предприятия приведено в работе [32].

## 5. Интеграция знаний

Для того, чтобы организовать свою структуру и адаптироваться в неопределенных условиях, *открытые самоорганизующиеся системы должны иметь некоторый запас знаний*. Это отличает их от закрытых систем, в которых вся имеющаяся информация используется (актуализируется) в процессе функционирования системы. Можно утверждать, что *наличие знания (неактуализированной информации) в системе свидетельствует об ее открытости*, а информационное взаимодействие является свойством закрытых систем. Это утверждение базируется на определении знания как системного опыта, зафиксированного в вещественной форме. Вещество выступает носителем знания или “мертвой” информацией и служит его хранилищем, а также генетическим средством

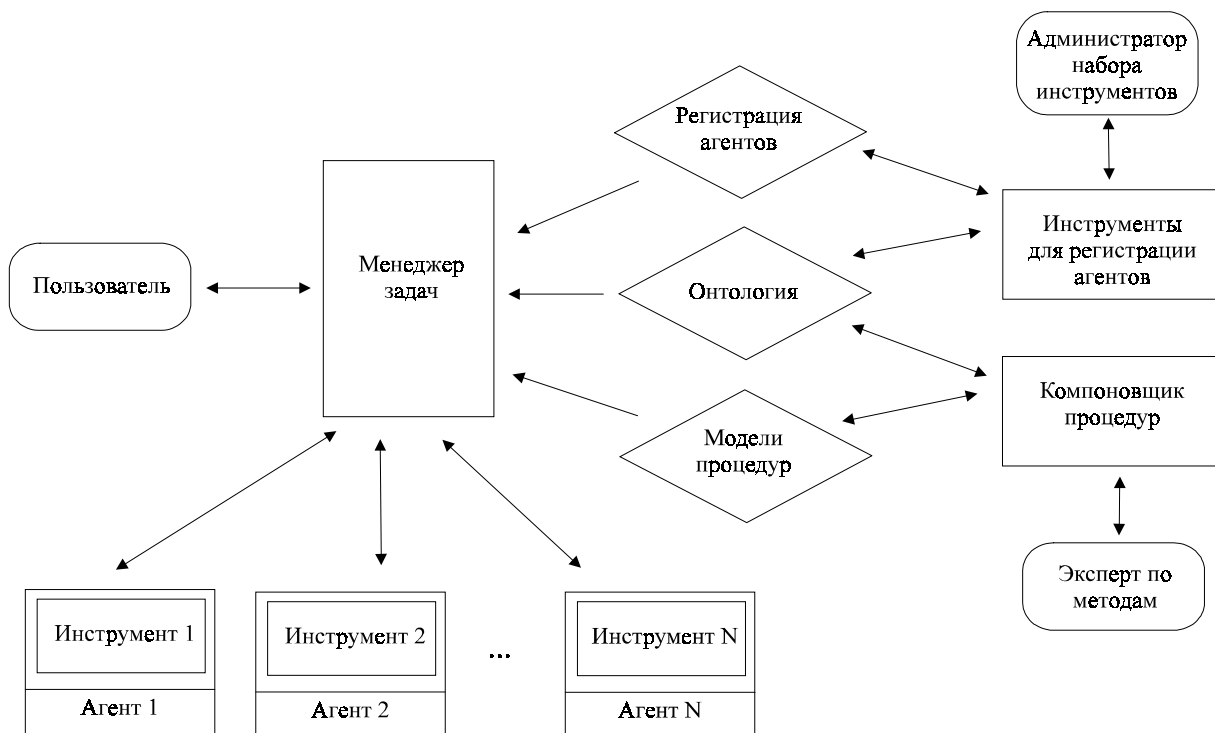


Рис. 3. Архитектура набора инструментальных программных средств

его передачи во времени. Энергия, как носитель информации, представляет собой актуальное знание [38].

Таким образом, *если рассматривать организацию как открытую систему*, способную гибко реагировать на изменения внешней среды, то *необходимо обеспечить приобретение, накопление и сведение в единый взаимосвязанный комплекс (интеграцию) знаний с целью их последующего эффективного использования.*

В процессе функционирования организации перед человеком возникают проблемы (чаще всего непредсказуемым образом). Изучая образовавшуюся проблемную ситуацию, человек прежде всего сталкивается с феноменом “непонимания”. Через попытки понять проблему, в которые он может включать и своих коллег, человек *формулирует задачу*, то есть переводит “непонимание” в “незнание”, а в результате *решения задачи* он приобретает “знание” [39]. Если теперь посмотреть на организацию с антропоцентрических позиций, то можно убедиться в том, что каждый человек в ней либо решает априори сформулированную задачу, либо пытается осознать возникшую проблему по схеме: “непонимание” - “незнание” - “знание”. И в том и в другом случае *человек приобретает знания* для последующего принятия решения.

Знания для решения задач и принятия решений приобретаются из самых разнообразных источников. Это могут быть научно-техническая литература и справочники, наблюдения и эксперименты, специалисты-эксперты и др. Извлеченные из этих источников разнородные знания должны быть систематизированы и сведены в единый комплекс, обладающий (по возможности) полнотой, непротиворечивостью и логической связностью, который можно назвать *мета-знанием*, то есть знанием о знаниях.

Иными словами, деятельность людей в организациях, прежде всего, связана с тем, какие знания они должны использовать, когда, где и как. Они постоянно приобретают и накапливают знания, обмениваются ими со своими коллегами, используют знания при решении задач и принятии решений. Такая постоянная “работа со знаниями” делает ин-

*теграцию знаний базовым, фундаментальным системообразующим фактором в организациях*, который “незримо” побуждает людей к самоорганизации. Справедливость выказанного утверждения подтверждается в работе [40], в которой сформулирована концепция *производственной системы, интегрированной знаниями.*

Поскольку в реальной жизни, наоборот, знания чаще всего оказываются дезинтегрированными в организациях, рассмотрим основную причину этой дезинтеграции - специализацию.

*Специализация* влечет за собой дезинтеграцию знаний сотрудников организации, коллективный труд которых должен привести к достижению поставленной цели. Каждый из них, являясь специалистом в узкой предметной области, должен действовать исходя из общих целей организации, согласовывая свои частные решения с результатами работы коллег. В крупных организациях осуществление такой гармоничной деятельности превратилось в одну из самых трудноразрешимых проблем. Суть ее состоит в том, что “целое” (общая цель) видится каждому специалисту “через призму” его субъективного восприятия действительности. При этом у сотрудника формируется своя собственная автоформализованная система знаний о “целом”, опираясь на которую он решает поставленные перед ним задачи. Понятно, что в этом случае композиция “частей” (результатов решения частных задач) в “целое” превращается в трудоемкий процесс [10].

А.А. Богданов видел в специализации главный источник препятствий на пути создания теории организации. Он писал [21], что “специализация оказала и продолжает оказывать человечеству величайшие услуги в борьбе с силами и тайнами природы. Но она создала также некоторые привычки мышления, консервативные и прочные, способные в данном случае сыграть роль вредных предубеждений. Специализация дробит поле труда и мысли, чтобы лучше им овладеть. Но дробление означает сужение этого поля для работников - специалистов, а вместе с тем и ограничение их кругозора”.

Эта проблема с особой остротой встает



в бюрократических организациях, построенных на принципе разделения труда на основе *функциональной специализации*, четкой (формальной) иерархии власти, фиксированных обязанностей сотрудников и системы процедур, определяющих порядок действий во всех ситуациях, встречающихся в процессе функционирования организации [1]. В таких организациях существует опасность постепенной *трансформации специалистов в функционеров* - людей, чья деятельность состоит в том, чтобы выполнять функции, то есть “функционировать”.

Функционер делает только то, что ему предписано, исходя из собственных представлений о способах реализации возложенной на него функции. Новые проблемы, которые не предусмотрены инструкциями, - не его проблемы. Если же несколько функционеров, тем не менее, вынуждены решать общую проблему, то в этом процессе произойдет сочетание разнородных, противоречивых, а подчас и несовместимых воззрений (называемое синкретизмом), которое не даст возможности принять эффективное решение.

Иными словами, в бюрократических организациях знания нужны только для поддержания отдельных функций, а увеличение числа функционеров (что чаще всего имеет место на практике) влечет за собой возрастание уровня дезинтеграции знаний. Кроме того, бюрократическая “формальная власть важна для того, чтобы обеспечить удовлетворение минимальных требований к работоспособности организации, но недостаточна для высокой эффективности ее действий. Она требует подчинения приказам и дисциплине, но не поощряет подчиненных прилагать максимум усилий, порождает у них нежелание брать на себя ответственность и проявлять инициативу” [41]. Поэтому подобные структуры, интегрированные инструкциями и приказами, *постепенно должны трансформироваться в организации, интегрированные знаниями* [10]. Эта тенденция отмечена в работе [11], автор которой пишет, что “организации с жестко регламентированной структурой управления использовали методы наказания и капитал, как главные рычаги власти. Организация будущего будет

использовать знания”. Он использует термин “смещение власти” для описания процесса замещения насилия и капитала - основных рычагов власти в организационных структурах - знаниями.

Для интеграции знаний в организации необходимо решение следующих задач:

1. Разработка единой системы понятий для обеспечения взаимопонимания между людьми – актерами, между людьми и компьютерами, а также между компьютерными средствами.

2. Приобретение, верификация и накопление в компьютерной сети знаний, относящихся к прошлому (генезис, прецеденты, методы и средства решения задач и моделирования), настоящему (мониторинг) и будущему (планы, проблематика и прогнозы) организации.

3. Обеспечение каждому актору доступа к тем накопленным знаниям, которые необходимы ему для решения поставленной задачи.

4. Создание условий для эффективной совместной (“командной”) работы акторов при решении междисциплинарных задач и коллективном принятии решений.

Решение первой задачи сводится к разработке онтологии организации. Вторая задача связывается с построением “платформы знаний” организации с помощью средств компьютерного представления и обработки знаний [10]. Третья задача предполагает организацию в компьютерной сети режима разделения информации (information sharing), позволяющего каждому сотруднику (актору) иметь доступ в реальном масштабе времени к любым информационным и программным ресурсам организации [7,42]. Решение четвертой задачи базируется на применении разнообразных компьютерных средств поддержки “командной работы” акторов, такие как электронные доски объявлений [40], телеконференции [43], мультиагентные системы [31] и др. Указанные задачи реализуются с помощью системы компьютерной интеграции знаний (СКИЗ) организации, функции которой укрупненно представлены на рис.4.

*Приобретение знаний* об организации и окружающей среде обеспечивается с помощью специалистов (инженеров по знаниям), владеющих методами и средствами извлече-

ния знаний из разнообразных источников, их компьютерного представления и обработки. Приобретение знаний не является какой-то разовой процедурой, а представляет собой *непрерывный процесс*, постоянно реализуемый в организации, в рамках которого особую роль играет *верификация знаний* (то есть оценка их истинности), поскольку в СКИЗ не должна попадать недостоверная информация.

*Накопление знаний*, систематизированных и специальным образом представленных, осуществляется в серверах корпоративной компьютерной сети СКИЗ. Наряду со знаниями, представляемыми в виде *понятий, образов, моделей и теорий*, в СКИЗ должны быть зафиксированы и *“знания о незнаниях”* в форме задач, вопросов и обнаруженных противоречий, поскольку знание и незнание – два различных аспекта познавательного процесса. Знание – его информационный результат, а незнание рассматривается как некоторая зафиксированная пассивная область, которую предполагается освоить путем перевода в знание [39].

*Знание всего взаимосвязанного комплек-*

*са задач (проблематики)* является чрезвычайно важным для каждого сотрудника организации, поскольку дает ему возможность оценивать свою роль в общей схеме решения задач и взаимодействовать с коллегами, прямо или косвенно влияющими на решение поставленной перед ними задачи.

При создании СКИЗ должна быть *решена проблема эволюции баз знаний* [44]. Дело в том, что открытие самоорганизующейся системы характеризует так называемое *“плавное равновесие”*, поскольку абсорбирование возмущений среды приводит не к первоначальному, а к новому равновесному состоянию [28]; то есть такие системы (как уже отмечалось выше) под воздействием возмущений не стабилизируются, а постоянно эволюционируют. Поэтому компьютерные системы, базирующиеся на знаниях, должны отражать эти изменения и эволюционировать в процессе их практического использования. Отсюда следует, что СКИЗ должна быть встроенной составной частью открытой системы – организации, которая *“отслеживает”* ее эволюцию. Только в этом случае решения, принимаемые на основе знаний, накоплен-

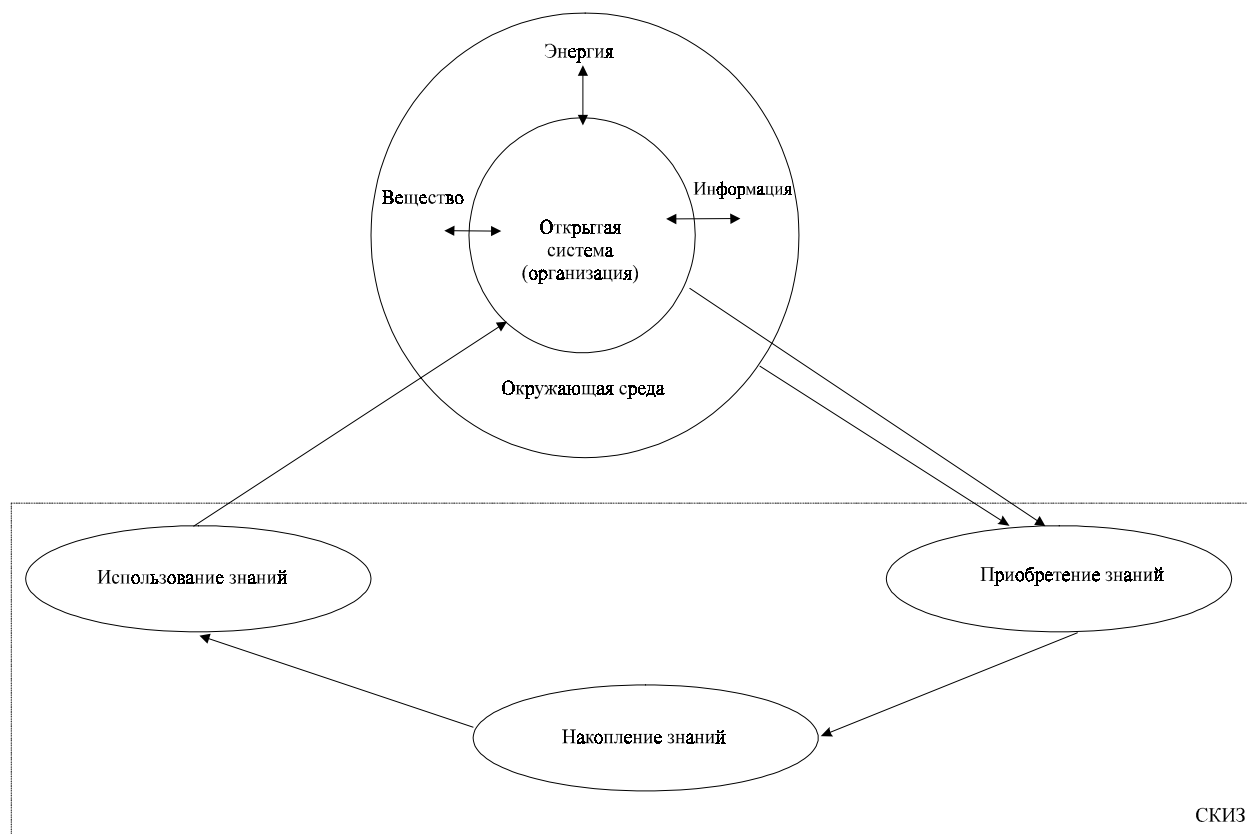


Рис. 4. Функции системы компьютерной интеграции знаний (СКИЗ)

ных в СКИЗ, могут быть согласованными между собой, что открывает новые возможности повышения эффективности управления открытыми системами.

*Использование знаний* предполагает разработку *механизмов доступа* к накопленным знаниям каждого сотрудника организации. Пользователю может понадобиться Web – страница с результатами какого–то прошлого эксперимента или программа, моделирующая поведение интересующего его объекта. Он может запросить сведения о состоянии дел у своих коллег и дополнительные ресурсы для решения своей задачи. Наконец, пользователь может сделать запрос на проведение телеконференции на предложенную им тему с целью уточнения ограничений и выработки общего подхода к решению междисциплинарной задачи.

Для реализации указанных и многих других возможностей в компьютерной сети должен быть предусмотрен большой арсенал разнообразных программных средств и новых информационных технологий, к числу которых можно отнести *сети ограничений* (constraint network) и разнообразные *решатели ограничений* (constraint solver), предназначенные для решения проблемы удовлетворения ограничений, а также программные средства для *автоматической генерации интегрированных (междисциплинарных) компьютерных моделей* объектов [45] с использованием баз знаний, ориентированных на ограничения (constraint – oriented Knowledge base) [46].

Разработка СКИЗ осуществляется на основе использования онтологии организации. Однако, несмотря на очевидность этого утверждения, обоснованного в предыдущем разделе, необходимо внести некоторые уточнения, поскольку само понятие “онтология организации” интерпретируется по-разному. В этом можно убедиться на примере онтологии предприятия (ОП), которая имеет, по крайней мере, четыре уровня рассмотрения [32]:

- *неформальная ОП* – версия на естественном языке;
- *формальная ОП* – версия Онтолингвы;
- *предзавершенная ОП* – общее название

двух предыдущих;

- *завершенная ОП* – ОП с реализованным набором инструментов.

И если неформальная ОП – это систематизированное вербальное описание, то завершенная ОП представляет собой инструментальную систему, подобную той, архитектура которой представлена, например, на рис. 3, и функции которой в значительной степени подобны СКИЗ. С этой точки зрения СКИЗ может рассматриваться как завершенная ОП.

В то же самое время СКИЗ – основа *среды деятельности* акторов; однако это еще не вся среда деятельности, в которой важную роль играют *структура организации* и связанные с ней производственные отношения, а также средства обеспечения деятельности, не входящие в СКИЗ (например, телефон, оргтехника и т.п.).

## 6. Заключение: принципы управления открытыми системами – организациями

1. *Неклассический подход* к исследованию и моделированию сложных систем – организаций, базирующийся на новых представлениях об *активности субъекта познания*, *эволюционной парадигме* и идеях *ситуационных исследований*.

2. Включение в понятие “управление” процессов *самоорганизации*, где управление является *внутренним свойством* сложной открытой системы, реализуемое совокупной деятельностью *акторов* – лиц принимающих решения.

3. Признание, что необходимым условием *устойчивого развития* организации является *согласованность принимаемых решений*, которая достигается путем *интеграции знаний*, выполняющей (совместно с целями) фундаментальную системообразующую функцию.

4. Разработка *онтологии организации*, определения которой обладают нормативной ролью, как первого шага на пути к интеграции знаний.

5. Создание *системы компьютерной интеграции знаний* организации, в которой реализуются разнообразные “интеграционные механизмы”, обеспечивающей *приобретение, на-*

**Таблица 1.** Основные термины, определенные в неформальной онтологии предприятия

<b>ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ и т.д.</b>	<b>ОРГАНИЗАЦИЯ</b>	<b>СТРАТЕГИЯ</b>	<b>МАРКЕТИНГ</b>	<b>ВРЕМЯ</b>
Деятельность	Человек	Задача	Продажа	Линия времени
Спецификация Деятельности	Машина	Выполняемая Задача	Потенциальная продажа	Время
Выполнять	Корпорация	Предполагаемая Задача	На продажу	Точка времени
Спецификация исполняемой деятельности	Партнерство	Исполнитель задачи	Предложение Продажи	
Время начала	Партнер	Стратегическая Задача	Продавец	
Время конца	Правовой субъект	Стремление	Реальный потребитель	
Пред-условие	Организационная единица	Видение	Потенциальный потребитель	
Эффект	Управлять	Задание	Потребитель	
Исполнитель	Уполномочивать	Цель	Продавец- посредник	
Побочная деятельность	Звено менеджмента	Запрашивание помощи	Изделие	
Полномочие	Законное владение	Стратегия	Запрашиваемая Цена	
Распорядитель Деятельности	Незаконное владение	Стратегическое Планирование	Цена Продажи	
Событие	Владение	Стратегические Операции	Рынок	
План	Владелец	Решение	Переменная сегментации	
Побочный план	Имущество/ Активы	Предположение	Сегмент рынка	
Планирование	Владелец Акций	Критичное Предположение	Исследование рынка	
Спецификация Процесса	Контракт Найма	Некритичное Предположение	Марка (техники)	
Возможности (потенциальные)	Акция	Фактор Влияния	Образ	
Умение/ Опыт	Владелец Акций	Критичный Фактор Влияния	Особенность	
Ресурс		Некритичный Фактор Влияния	Потребность	
Размещение Ресурсов		Критичный Фактор Успеха	Потребность Рынка	
Замещение Ресурсов		Риск	Продвижение	
			Конкурент	

копление и эффективное использование знаний.

6. Преобразование на основе интеграции знаний “жестких” бюрократических структур в голонические системы, сочетающие стабильность иерархии с гибкостью гетерархии, в которых повышается роль децентрализо-

ванного принятия решений, гибкого планирования и самоуправления.

7. Использование организациями будущего знаний как главного рычага власти и трансформация их в организации, интегрированные знаниями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р. Джонсон, Ф. Каст, Д. Розенцвейг. Системы и руководство (теория систем и руководство системами) // М., Изд-во "Советское радио", 1971.
2. H.A. Shepard. Changing Relationships in Organizations. // In James G. March (ed), Handbook of Organizations, Rand Mc Nally and Company, Chicago, Ill, 1965.
3. T.D. Schellhardt, C. Hymowitz. US Manufactures Face Changes in Years Ahead. // The Wall Street Journal, May 2, 1989.
4. G.J. Grayson, C.O. Dell. American Business: a Two Minute Warning // NY, Free Press, 1988.
5. Р.Е. Стейер, Д.А. Беласко. Управление: от старых форм к новым реальностям // В энциклопедическом справочнике "Современное управление", т.1, М., Издатцентр, 1997, с.с.1-3-1-9.
6. J. Dong, Y. Shi, H. Liu. A Holonic Manufacturing Framework for Concurrent Engineering and Enterprise Integration // Proceedings of the International Conference on Concurrent Engineering, 1995, USA, Washington D.C., p.p.151-161.
7. В.А. Виттих. Согласованная инженерная деятельность. Состояние, проблемы, перспективы // Проблемы машиностроения и надежности машин, N1, 1997, с.с. 6-14.
8. Дон Е. Марш. Теория и практика управления // В энциклопедическом справочнике "Современное управление", т.1, М., Издатцентр, 1997, с.с. 1-10-1-18.
9. Ph.E. Agre, D. Chapman. What Are Plans for? // Robotics and Autonomous Systems, N6, 1990, p.p.17-34.
10. В.А. Виттих. Управление открытыми системами на основе интеграции знаний. // Автоматика, N3, 1998, с.с. 38-49.
11. Д.Д. Хэмpton. Организации будущего. // В энциклопедическом справочнике "Современное управление", т.1, М., Издатцентр, 1997, с.1-69-1-74.
12. В.С. Стетин, В.Г. Горохов, М.А. Розов. Философия науки и техники. // м., Гардарика, 1996, с.с. 291 – 306.
13. И. Пригожин, И. Стенгерс. Порядок из хаоса (новый диалог человека с природой) // М., Прогресс, 1986.
14. Л.Б. Баженов, В.С. Евдокимов. Метод принципов и метод гипотез и проблема соотношения феноменологических и объяснительных теорий. // В сб. "Методы научного познания и физика", М., "Наука", 1995, с.с. 121-136
15. В. Гейзенберг. Роль феноменологических теорий в системе теоретической физики. // УФН, т. 91, вып. 4, с.731
16. Б. Чендов. О феноменологическом методе в физике. // В сб. "Методы научного познания и физика", М., "Наука", с.с.136-149
17. В.С. Стетин. Структура и динамика научного познания. // В сб. "Философия науки и техники", М., Гардарика, 1996, с.с. 191-306
18. Л.А. Маркова. Общие модели истории науки. / / В сб. "Философия и методология науки", М., АспектПресс, 1996, с.с. 388-426.
19. А.А. Богданов. Тектология. Всеобщая организационная наука // М., Наука, 1989, кн. 1-2.
20. С.Н. Пустыльник. Принцип подбора как основа тектологии А. Богданова // Вопросы философии, N8, 1995, с.с. 24-30.
21. А.А. Богданов. Тайна науки // В сб. Русский позитивизм, С.-П., Наука, 1995, с.282-283.
22. Г. Саймон. Науки об искусственном. // М., Мир, 1972.
23. Г. Хакен. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. // М., Мир, 1991, с.28.
24. Т. Саати, К. Кернс. Аналитическое планирование. Организация систем. // М., "Радио и связь", 1991.
25. Научно-технический прогресс (словарь) // М., Изд-во политической литературы, 1987, с.304.
26. В.Ф. Берков, Я.С. Яскевич, В.И. Павлюкевич. Логика (Учебное пособие для вузов) // Минск., "ТетраСистемс", 1997, с.356.
27. В.Ш. Рубашкин. Представление и анализ смысла в интеллектуальных информационных системах. – М., Наука, 1989, с.19.
28. Современный философский словарь (под редакцией проф. В.Е. Кемерова) // М., Изд-во "Одиссей", 1996.
29. Философский энциклопедический словарь.- М., ИНФРА-М, 1997.
30. В.А. Виттих, О.П. Скобелев. Когнитивный подход к построению интеллектуальных систем для исследования технических объектов на основе принципа аналогий. – Материалы Всесоюзной конференции "Интеллектуальные системы в машиностроении", часть 3, Сама-

- ра, 1991, с.с. 53-58.
31. V.A. Vittikh, P.O. Skobelev. Multi-agent systems for modelling of self-organization and cooperation processes // Proceedings of the XIII International Conference on the Application of Artificial Intelligence in Engineering, 1998, Ireland, Galway.
  32. M. Uschold, M. King, S. Moralee, Y. Zorgios. The Enterprise Ontology. – The Knowledge Engineering Review, v.13, N1, 1998, p.p. 31-88.
  33. T.R. Gruber. A translation approach to portable ontologies. – Knowledge Acquisition, v.5, N2, 1993, p.p. 199-220.
  34. M. Uschold, A. Tate. Putting ontologies to use. // The Knowledge Engineering Review, v.13, N1, 1998, p. 1-3.
  35. V.A. Vittikh. Engineering theories as a basis for integrating deep engineering knowledge. // Artificial Intelligence in Engineering, vol.11, №1, 1997, p.p. 25-30.
  36. В.А.Виттих. Интеграция знаний при исследованиях сложных систем на основе инженерных теорий. // Известия РАН. Теория и системы управления, №5, 1998.
  37. I.A. Budyachevsky, V.A. Vittikh. Knowledge-based calculus: a logical - computational framework for engineering theories. // Proceedings of the XI International Conference on the Application of Artificial Intelligence in Engineering, Florida, USA, 1996.
  38. Ю.И. Шемакин, А.А.Романов. Компьютерная семантика // М., Научно – образовательный центр “Школа Китайгородской.” 1995, с 10.
  39. Современный философский словарь (под редакцией проф. В.Е.Кемерова) // М., Изд-во “Одиссей”, 1996, с.с190-191.
  40. S.Gallagher, J.Gillespie, M.T.Khorami. Computer Integrated Manufacturing (CIM) Systems Are Dead. Long live Knowledge Integrated Manufacturing (KIM) Systems // Proceedings of the International Conference “Factory-2000”, 1994, Great Britain, York, 257-266.
  41. P.M. Blau, W.R. Scott. Formal Organization. // Chandler Publishing Company, San Francisco, Calif., 1962.
  42. V.Jagannathan, R. Karinthe, R. Raman, G. Almiassi. Strategies for Wide-area Information Sharing // Proceedings of the International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications; 1994, USA, Pennsylvania, Pittsburg, p.p. 15-21.
  43. L. Gradinau, G. Beuchot. Conferencing framework: Applications and Communications Aspects // Proceedings of the International Conference on Concurrent Engineering, 1995, USA, Washington D.C, p.p. 361-371.
  44. M.Meyer. Issues in Concurrent Knowledge Engineering: Knowledge Sharing and Knowledge Evolution // Proceedings of the International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Pennsylvania, Pittsburgh, USA, 1994, p.p. 285-294.
  45. I.A. Budyachevsky, V.A. Vittikh. A knowledge-based system for automated generation of engineering models. // Proceedings of the IX International Conference on the Application of Artificial Intelligence in Engineering, Pennsylvania, USA, 1994, p.p. 229-236.
  46. I.A. Budyachevsky, V.A. Vittikh. A constraint-oriented knowledge base for modeling and simulation in concurrent engineering. // Proceedings of the International Conference on Concurrent Engineering, 1995, USA, Washington D.C., p.13-19.

## CONCEPTION OF OPEN ORGANIZATIONAL SYSTEMS CONTROL

© 1999 V.A. Vittikh

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

Conception of open systems control is developed to be applicable for organizations. Such organizations are complex systems of artificial origin. The organizations combine people and technologies into one expedient whole. In contrast to the prevailing rigid hierarchical structures, which use superior-subordinate relations, the proposed conception considers organizations as a living organism, which are developing and evolving to more complex and viable systems. Momenta of this evolution are control processes, which are carried out by decision-making personal. The control is considered as a complex systems function, which is directed to ordering and integrity preservation of system and its organization. The essence of “control” notion included the processes of self-organization. Furthermore, the control is indispensable internal property of the system. Necessary condition for development of complex system or organization is decisions making concurrency, which can be reached by knowledge integration that realizes a fundamental system-forming function.

## СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ МНОГОМЕРНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛОПАТОЧНЫХ И ПОРШНЕВЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

© 1999 Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Обоснована проблема измерения координатных составляющих многомерных перемещений. Предлагается подход к построению системы измерения, предусматривающий использование кластеров одновитковых вихретоковых датчиков с чувствительным элементом в виде отрезка проводника. Приведена обобщенная концептуальная модель процесса измерения, которая детализируется описаниями алгоритмов сбора, преобразования, выделения информативного сигнала и вычисления координатных составляющих в лопаточных и поршневых силовых установках. Приведены технические и метрологические характеристики магистрально-модульных систем, реализующих предложенный подход и алгоритмы. Рассматриваются также пути интеллектуализации этих систем, обеспечивающие повышение достоверности полученных результатов и позволяющие оценить факторные координатные составляющие многомерных перемещений.

В современных силовых установках класса лопаточных и поршневых машин решающее влияние на экономичность и надежность оказывают зазоры между основными подвижными и неподвижными элементами конструкции. В лопаточных машинах – между торцами лопаток рабочего колеса ротора и статором, в поршневых машинах – между поршнем и цилиндром.

Известно, что от величины радиальных зазоров в компрессорах газотурбинных двигателей зависят: коэффициент полезного действия, запас газодинамической устойчивости, сохраняемость характеристик в процессе эксплуатации. Например, уменьшение радиальных зазоров в высоконагруженных ступенях компрессора на 1% приводит к увеличению коэффициента полезного действия на 1...3% и запаса устойчивости на 3...8%.

Кроме того, значительное влияние на основные показатели силовых установок оказывают зазоры в опорных подшипниках скольжения лопаточных и поршневых силовых установок, в шатунных подшипниках поршневых машин и других элементах конструкции.

Очевидно, что перемещения элементов конструкции, формирующие зазор, являются многомерными, причем сам зазор может оказаться лишь одной координатной составляющей многомерного перемещения элемента

конструкции силовой установки в выбранной системе отсчета. Диапазон и характер многомерных перемещений зависит от режима работы силовой установки и соответствующих изменений тепловых, упругих и пластических деформаций элементов конструкции установки (например, в лопаточных машинах при вращении ротора происходят радиальные, осевые, угловые смещения и колебания торцов лопаток, радиальные деформации и осевые смещения колеса ротора, радиальные деформации статора и т.п.) Можно утверждать, что изучение поведения координатных составляющих многомерных перемещений (в том числе и зазоров) представляет исключительную значимость в процессе разработки новых машин, обладающих более высокой экономичностью и надежностью.

Решение задачи с помощью существующих расчетных методов не обеспечивает требуемой точности (погрешности составляют десятки и даже сотни процентов). Измерение координатных составляющих в процессе экспериментальных исследований силовых установок также сопряжены с объективными трудностями – они должны выполняться без механического контакта, в ограниченном пространстве, в тяжелых, а иногда и экстремальных условиях (скорость движения лопаток достигает 400 м/с, температура в газовых турбинах 1200°C, изменяющиеся диэлектрические

кие характеристики среды, вибрации и т.п.).

В таких условиях известные бесконтактные методы, а также реализующие их системы измерения имеют ограниченные возможности, – они одномерны (измеряют одну координатную составляющую – зазоры), недостаточно точны, не обеспечивают работоспособность во всем диапазоне внешних мешающих факторов. Существующие системы жестко ориентированы на конкретные разновидности силовых установок, отсутствуют единая идеология и общие принципы построения, что затрудняет процесс проектирования и создания новых систем. Кроме того, уровень автоматизации измерений в существующих системах, как правило, недостаточен, что приводит к увеличению длительности исследований и испытаний, и в конечном итоге вызывает увеличение затрат на проведение экспериментов.

Ставший необходимостью поиск нетрадиционного подхода к построению систем, включая их наиболее значимые компоненты и, в первую очередь, средства первичного преобразования измерительной информации, привел к идее использования в создаваемых системах одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) простейшей формы в виде отрезка проводника, объединенных в группы – кластеры, а также применения методов измерения, реализуемых с помощью кластеров ОВТД при поддержке специальных алгоритмов сбора, преобразования, выделения информативного сигнала и алгоритмов вычисления координатных составляющих.

Описание отдельных методов и средств первичного преобразования, систем измерения и алгоритмов их функционирования, ориентированных на применение в газотурбинных двигателях и двигателях внутреннего сгорания, нашли отражение в серии публикаций [1, 3-9]. В то же время в литературе отсутствуют какие-либо сведения о систематизации указанных методов, средств и алгоритмов, а также обобщенное представление процесса измерений в силовых установках различных классов, что составляет основу единого подхода к построению систем измерения различного назначения. Настоящая ста-

тья призвана восполнить существующий пробел. Кроме того, статья содержит краткий обзор разработанных систем измерения, включая датчики, и описания их характеристик, которые позволяют судить о современном состоянии и перспективах их дальнейшего развития.

В существующих системах, как правило, применяются такие конструкции оптических, емкостных и вихретоковых датчиков в виде многовитковых катушек, которые затруднительно (или невозможно) использовать для измерения многомерных перемещений. Кроме того, внешние мешающие факторы – загрязнение в зоне расположения датчиков, изменения давления, химического состава окружающей среды, влажности и ионизация газов оказывают негативное влияние на оптические и емкостные датчики, а высокая температура – на традиционные конструкции вихретоковых датчиков, ограничивая область их применения.

Предлагаемые конструкции ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника [1] предназначены для измерения многомерных перемещений в широком температурном диапазоне (до 1200°C). С помощью безиндуктивных тоководов (близкорасположенных и изолированных друг от друга соосных цилиндров или проводящих полос) ЧЭ вносится в зону измерений с неблагоприятными внешними условиями (в частности, в среду с повышенной температурой). Токовод и ЧЭ образуют виток вторичной обмотки согласующего трансформатора, расположенного в нормальных условиях, а его вторичная обмотка включается в измерительную цепь системы измерения. Объединение датчиков в кластере предполагает такое размещение в пространстве (зоне измерения) с заданной ориентацией ЧЭ относительно элемента конструкции (ЭК), при котором его многомерные перемещения (МП) вызывают изменения естественных выходных сигналов (индуктивностей) всех датчиков в кластере, содержащих информацию о координатных составляющих, причем число датчиков в кластере определяется числом измеряемых составляющих.

Графическая интерпретация обобщенной концептуальной модели процесса изме-



рений представлена на рис. 1.

Состояние объекта в процессе испытаний определяется режимом работы и условиями внешней среды. Параметры режима (ПР) зависят от методики исследований объекта и задаются испытателем. Информация о ПР и параметрах внешней среды (ПВС) воспринимается датчиками температуры, давления, оборотов и т.д. (СД - сигналы датчиков). Заданные ПР и ПВС определяют характеристики рабочего процесса, в том числе энергетическую напряженность, нагрузку, состояние внутренней среды силовой установки.

В соответствии с заданным режимом и внешними условиями формируются многомерные перемещения элементов конструкции (МП ЭК).

Каждый ЭК должен быть доступен для взаимодействия с кластерами бесконтактных ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника.

ЧЭ ОВТД воспринимают МП ЭК, а затем с помощью ряда преобразований и цифровой обработки определяются координатные составляющие (КС) МП. Параметры среды объекта (ПСО), в которой находятся ЭК и ЧЭ датчиков, влияют на электрофизические свойства (ЭФС) материалов, из которых из-

готовлены ЭК и ЧЭ. ПСО преобразуются соответствующими датчиками для последующей коррекции влияния среды на результаты измерений МП. Часть параметров объекта, представленная одномерными перемещениями (ПОП), может быть преобразована с помощью традиционных датчиков, серийно изготавливаемых промышленностью.

Таким образом, в систему измерения поступают естественные выходные сигналы кластеров ОВТД, преобразующих МП ЭК (СД<sub>ЭК</sub>), датчиков ПР (СД<sub>ПР</sub>), датчиков ПВС (СД<sub>ПВС</sub>), датчиков ПСО (СД<sub>ПСО</sub>), датчиков ПОП (СД<sub>ПОП</sub>). Средства преобразования и цифровой обработки СД обеспечивают приведение результатов к физическим величинам и корректируют влияние внешних условий при определении КС МП (чтобы не загромождать рис. 1, промежуточные преобразования и обработка не показаны). На основе полученных КС МП могут быть найдены факторные КС (ФКС), т.е. составляющие, вызванные определенными видами физических воздействий. На базе ФКС МП и найденных параметров режима, среды объекта, внешней среды вычисляются параметры объекта (ПО).

Процесс измерения может быть задан и в функциональном виде.

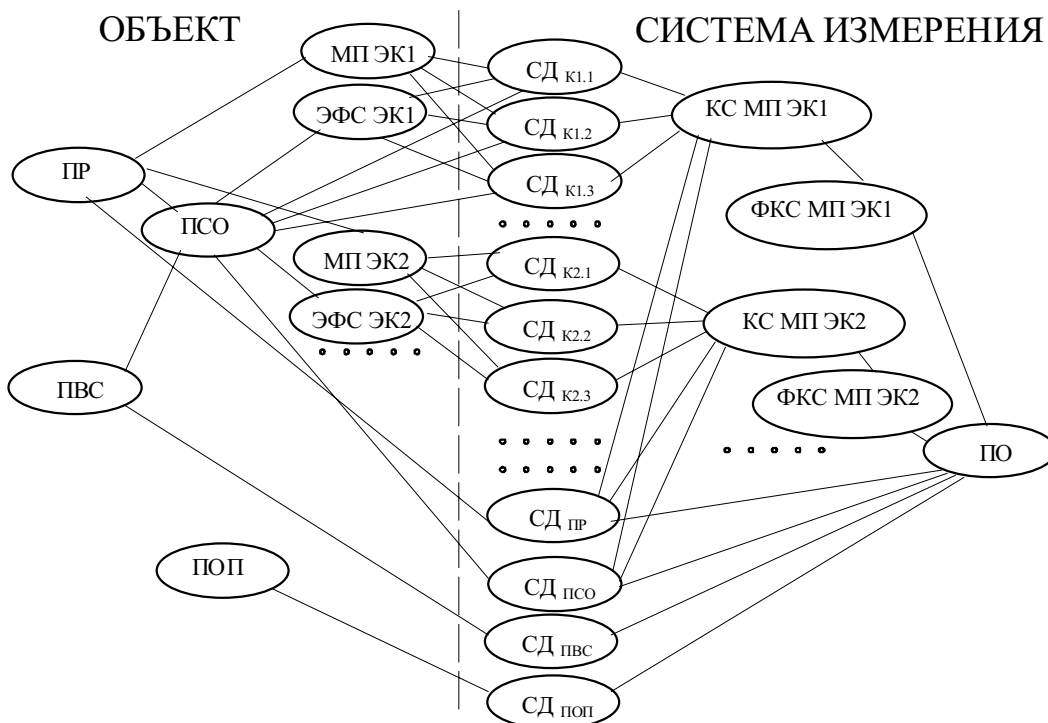


Рис.1. Графическая интерпретация обобщенной концептуальной модели процесса измерений

В рассматриваемой силовой установке заданный режим работы, параметры внешней и внутренней среды определяют векторы перемещения элементов в пространстве.

$$\left. \begin{aligned} \vec{D}_{\text{ЭК1}} &= f_{\text{МПЭК1}}(\vec{P}_p, \vec{P}_{\text{BC}}, \vec{P}_{\text{CO}}), \\ \vec{D}_{\text{ЭК2}} &= f_{\text{МПЭК2}}(\vec{P}_p, \vec{P}_{\text{BC}}, \vec{P}_{\text{CO}}), \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\vec{P}_p$ ,  $\vec{P}_{\text{BC}}$ ,  $\vec{P}_{\text{CO}}$  - векторы состояния параметров режима, внешней среды, среды объекта соответственно.

Согласно рис. 1 МП ЭК ( $\vec{D}_{\text{ЭК}}$ ) преобразуется кластерами ОВТД. Естественными выходными сигналам ОВТД в составе кластера ( $\text{СД}_k$ ) является изменения индуктивности ( $L$ ), которые зависят также и от ЭФС ЭК (вектор состояния параметров  $\vec{P}_{\text{ЭФСЭК}}$ ) и от ПСО ( $\vec{P}_{\text{CO}}$ ), причем  $\vec{P}_{\text{ЭФСЭК}}$  зависит от ( $\vec{P}_{\text{CO}}$ ).

Для кластера с номером 1:

$$\left. \begin{aligned} L_{k1.1} &= f_{k1.1}(\vec{D}_{\text{ЭК1}}, \vec{P}_{\text{CO}}, \vec{P}_{\text{ЭФСЭК1}}), \\ L_{k1.2} &= f_{k1.2}(\vec{D}_{\text{ЭК1}}, \vec{P}_{\text{CO}}, \vec{P}_{\text{ЭФСЭК1}}), \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На основе выходных сигналов датчиков с помощью методов, учитывающих специфику объектов и реализуемых в алгоритмах последующих преобразований и обработки системы измерения, определяются КС МП ЭК.

$$\left. \begin{aligned} D_{\text{ХЭК1}} &= f_{\text{ХЭК1}}(\vec{L}_{k1}, \vec{S}_{\text{BC}}, \vec{S}_p, \vec{S}_{\text{CO}}, \vec{S}_{\text{ОП}}), \\ \varphi_{\text{ХЭК1}} &= f_{\varphi_{\text{ХЭК1}}}(\vec{L}_{k1}, \vec{S}_{\text{BC}}, \vec{S}_p, \vec{S}_{\text{CO}}, \vec{S}_{\text{ОП}}), \\ D_{\text{YЭК1}} &= f_{\text{YЭК1}}(\vec{L}_{k1}, \vec{S}_{\text{BC}}, \vec{S}_p, \vec{S}_{\text{CO}}, \vec{S}_{\text{ОП}}), \\ \varphi_{\text{YЭК1}} &= f_{\varphi_{\text{YЭК1}}}(\vec{L}_{k1}, \vec{S}_{\text{BC}}, \vec{S}_p, \vec{S}_{\text{CO}}, \vec{S}_{\text{ОП}}), \\ D_{\text{ZЭК1}} &= f_{\text{ZЭК1}}(\vec{L}_{k1}, \vec{S}_{\text{BC}}, \vec{S}_p, \vec{S}_{\text{CO}}, \vec{S}_{\text{ОП}}), \\ \varphi_{\text{ZЭК1}} &= f_{\varphi_{\text{ZЭК1}}}(\vec{L}_{k1}, \vec{S}_{\text{BC}}, \vec{S}_p, \vec{S}_{\text{CO}}, \vec{S}_{\text{ОП}}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $D_{\text{ХЭК1}}$ ,  $D_{\text{YЭК1}}$ ,  $D_{\text{ZЭК1}}$ ,  $\varphi_{\text{ХЭК1}}$ ,  $\varphi_{\text{YЭК1}}$ ,  $\varphi_{\text{ZЭК1}}$  – КС ЭК под номером 1;  $\vec{L}_{k1}$  – вектор состояния естественных выходных сигналов ОВТД в составе кластера под номером 1;  $\vec{S}_{\text{BC}}$ ,  $\vec{S}_p$ ,  $\vec{S}_{\text{CO}}$ ,  $\vec{S}_{\text{ОП}}$  – векторы состояния выход-

ных сигналов датчиков, преобразующих ПВС, ПР, ПСО, ПОП.

Аналогично могут быть представлены КС МП для остальных ЭК силовой установки.

Полученные КС МП позволяют оценить ФКС МП и найти ПО.

Представленные на рис. 1 и в выражении (2) преобразования МП с помощью кластеров ОВТД, последующие преобразования и обработку сигналов для получения КС (выражение (3)) можно классифицировать как совокупные измерения [2], которые в рассматриваемых системах имеют свою специфику (практически на всех уровнях – схемном, структурном и алгоритмическом).

В частности, в лопаточных установках изменение индуктивности ОВТД при взаимодействии ЧЭ и торцов проходящих лопаток очень мало и сопровождается воздействием интенсивных электромагнитных помех, характерных для стендового оборудования. Увеличить уровень полезного сигнала на выходе измерительной схемы позволяет импульсное питание. Минимальное время получения выходного сигнала (амплитуды импульса) обеспечивает мост Блумлейна, в котором при импульсном питании реализуется один из известных методов тестовых переходных процессов - метод первой производной [3]. Метод первой производной обеспечивает также подавление температурных изменений сопротивления ОВТД. Вместе с тем, динамические возможности этого метода ограничены длительностью рассеяния энергии, накопленной в измерительной схеме за время импульса питания, которая возрастает с увеличением длины линии между ОВТД и измерительным преобразователем, включающим измерительную схему. Ее время восстановления, зависящее в основном от длительности рассеяния энергии, определяет минимальный период последовательности импульсов питания и шаг дискретизации периода вращения ротора (приводного вала) силовой установки.

С другой стороны, период импульсов питания определяется требуемым шагом квантования изменений индуктивности ОВТД, причем наиболее органично кванто-

вание производится в процессе преобразования углового положения ротора (приводного вала) в цифровой код. Однако, использование в лопаточных машинах датчиков и преобразователей “угол-код”, механически связанных с вращающимися ЭК, как правило, не допускается, и существует лишь одна возможность определения периода импульсов питания с помощью штатного бесконтактного индукционного датчика частоты вращения (ДЧВ) и вычислительной процедуры, которой предшествует цифровое преобразование периода вращения ротора. При этом в процедуре вычислений должно соблюдаться условие постоянства шага квантования по углу поворота ротора на различных скоростях его вращения.

Если время восстановления измерительной схемы меньше вычисленного периода импульсов питания на максимальных оборотах ротора, то применяется алгоритм, в котором формирование импульсов питания и получение соответствующих цифровых кодов завершается за один период вращения ротора [4].

Если время восстановления превышает вычисленный период, то следует использовать алгоритм, в котором формирование импульсов питания и преобразование в код происходит за несколько оборотов ротора. При этом на каждом обороте формируется пакет импульсов, число которых в пакете равно числу лопаток, а на каждом последующем обороте производится сдвиг пакета на шаг дискретизации (алгоритм назван мультитробоскопическим) [5, 6]. Полученные цифровые коды в обоих алгоритмах подвергаются далее интерполяционной обработке, в результате которой определяются максимальные значения, соответствующие минимальной индуктивности датчика в момент прохождения торца лопатки ЧЭ ОВТД.

В системах измерения, ориентированных на поршневые силовые установки, имеется возможность простого преобразования угла поворота коленчатого вала в цифровой код и, следовательно, квантования угловых положений вала (оно осуществляется с помощью тех же датчиков (ДЧВ), которые взаимодействуют с зубцами шестерни на махови-

ке коленвала). Формирование импульсов питания и преобразование сигналов ОВТД в код происходит синхронно с прохождением зубцов под ДЧВ в течение рабочего цикла установки [7].

Для функционирования алгоритмов вычисления КС необходимо располагать семействами градуировочных характеристик измерительных каналов, полученных экспериментально при фиксированных значениях мешающих факторов, в первую очередь, температуры, а также - конкретными значениями кодов в каждом канале ОВТД и в каналах датчиков температуры, встроенных в ОВТД или расположенных рядом с ними для коррекции результатов измерений. В число основных вычисляемых КС МП в системах измерений, предназначенных для лопаточных силовых установок, входят радиальные и осевые смещения<sup>1</sup>. В системах измерения, предназначенных для поршневых установок, в алгоритмах вычислений предусмотрены два этапа, на первом - определяются зазоры в местах установки ОВТД, на втором – КС (смещение поршня относительно цилиндра, смещение вкладыша относительно шейки коленвала и шейки относительно опоры в шатунном подшипнике (ШП) и подшипнике коренной опоры (ПКО) соответственно) [7].

Далее приведены описания созданных и апробированных в стендовых условиях конструктивных вариантов ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника и систем измерения, предназначенных для испытаний лопаточных и поршневых силовых установок и реализующих разработанные методы и алгоритмы.

В базовой конструкции ОВТД, представ-

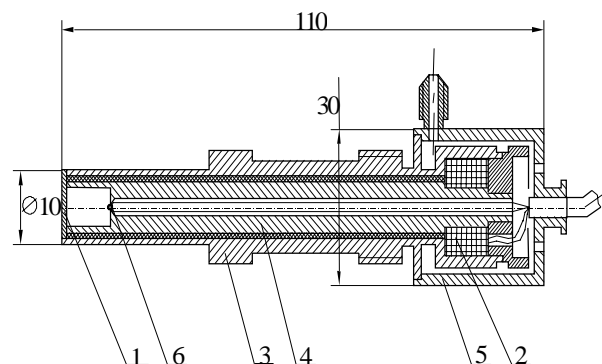


Рис.2. Базовая конструкция ОВТД

ленной на рис.2, чувствительный элемент 1 (линейный проводник) подключен к согласующему трансформатору 2 через “безиндуктивный” токовод из двух коаксиальных цилиндров 3 и 4 [1].

Согласующий трансформатор выполнен на тороидальном ферритовом сердечнике с многовитковой первичной обмоткой и вторичным объемным витком, образованным корпусом датчика. В корпусе датчика 5 на рис. 2 предусмотрен штуцер для охлаждения согласующего трансформатора жидкостью или газом. ЧЭ через установочное отверстие вводится внутрь неподвижной части объекта в зону контроля МП, а часть датчика с согласующим трансформатором остается вне зоны повышенных температур. Для учета влияния температуры на характеристики датчика в конструкцию встроена термопара 6. Датчик, представленный на рис. 2, предназначен для измерений в газо-воздушном тракте газотурбинного двигателя (ГТД). Выполненный из латуни, он используется для измерения в ступенях компрессора, где температура достигает 500 – 550°С (ОВТД-К-3(Л), табл.1). Изготовленный из нержавеющей стали (жаропрочного хромоникелевого сплава) датчик используется для измерения зазоров в турбинах, где температура достигает 1200°С (ОВТД-Т-3(НС), табл.1). Существуют варианты датчиков из жаропрочных сплавов, предназначенные для компрессоров (ОВТД-К-3(НС)).

Датчик, предназначенный для преобразования зазоров между поршнем и цилиндром

(ПЦ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС), имеет аналогичную конструкцию, но меньшие габариты (ОВТД-ПЦ-0.1).

Если ЧЭ датчика работает в сравнительно мягких условиях, приемлемых для магнитопровода согласующего трансформатора, то необходимость в удлиненном токовом отпадает. В конструкциях датчиков с укороченным тоководом согласующий трансформатор находится вблизи зоны измерения. Корпус датчика (он же укороченный токовод) образует объемный виток согласующего трансформатора и контур тока, в который включается ЧЭ в виде линейного отрезка проводника. Такие датчики предназначены, в частности, для использования в винтовентиляторах ГТД (ОВТД-В-10(Л), табл.1). В малогабаритном исполнении они обеспечивают преобразование зазоров, составляющих доли миллиметра, и предназначены для установки в крышке ПКО и в шейке ШП кривошипно-шатунного механизма ДВС (ОВТД-ШП-0.1, ОВТД-ПКО-0.1, табл.1).

Разработанные датчики входят в состав магистрально-модульных систем измерения (СИ). Характеристики и параметры СИ сведены в табл. 2, где первые шесть позиций занимают системы для стендовых испытаний компрессоров и турбин ГТД, а остальные - системы для стендовых испытаний ДВС.

В группе СИ, предназначенной для испытаний компрессоров и турбин ГТД, разработаны две разновидности. В первой – реализован мультитростробоскопический алгоритм (для его осуществления необходимо несколь-

**Таблица 1.** Характеристики одновитковых вихретоковых датчиков с чувствительным элементом в виде отрезка проводника

Наименование	Тип датчика					
	ОВТД-К-3 (Л)	ОВТД-Т-3(НС)	ОВТД-В-10 (Л)	ОВТД-ПЦ-0.1	ОВТД-ШП-0.1	ОВТД-ПКО-0.1
Диапазон измер. зазоров, мм	0...3,0	0...3,0	0...10,0	0...0,150	0...0,1	0...0,1
Диапазон рабоч. температур, °С	до 550	до 1200	до 50	до 230	до 110	до 100
Номин. значение индукт., мГн	60	30	100	60	30	60
Девияция индуктивности, мГн	2,0	1,0	6	8	6	3
Диаметр устан. отверстия, мм	10,0	14,0	36,0	10,0	6,5	7,0
Габариты, мм	10x20x40	14x34x115	36x65	10x20x40	6.5x10	7x9x14
Материал	Латунь <sup>2</sup>	Нерж сталь	Латунь	Латунь	Латунь	Латунь
Применение	Компр. ГТД	Турб., компр. ГТД	Винтовент., ГТД	ПЦ ДВС	ШП ДВС	ПКО ДВС

Таблица 2. Характеристики разработанных систем измерения

Наименования	Разновидности систем					
	СИ-01	СИ-02-П	СИ-03-М	СИ-04-Б	СИ-05	СИ-06
Объект	Компр. ГТД	Компр. ГТД	Компр., турб. ГТД	Компр. ГТД	ШП, ПКО ДВС	ШП, ПКО, ПЦ ДВС
Режимы работы	стац.	стац.	стац.	стац., нестационац.	стац., нестационац.	стац., нестационац.
Коорд. составляющие	Y (P3)	Y (P3)	Y, X (P3, OC)	Y (P3)	X, Y	X, Y
Вид датчиков	ОВТД-К-3(Л)	ОВТД-К-3(Л)	ОВТД-К(Т)-3(НС)	ОВТД-К-3(НС)	ОВТД-ШП(ПКО)-0,1	ОВТД-ШП(ПКО, ПЦ)-0,1
Число каналов ОВТД	4	4	16	1	16	40
Вр. преобр. на кан, мкс	30	30	30	1	1.5	1.5
Длина линии «ОВТД-преобразователь», м	до 20	до 20	до 20	до 1 (встроены в линию преобр.)	до 2 (выносной преобраз.)	до 3 (выносной преобраз.)
Разрядность АЦП	10	10	10	10	12	12
Средства обработки	микропр., ПЭВМ	микропр.	микропр., ПЭВМ	микропр., ПЭВМ	микропр., ПЭВМ	микропр., ПЭВМ
Средства предст. инф.	экран, принтер	табло, принт.	экран, принтер	экран, принтер	экран, принтер	экран, принтер
Конструктив	КАМАК	Евромеханика	Евромеханика	Евромеханика	Евромеханика	Евромеханика

ко периодов вращения ротора) и в этой связи разработанные системы ориентированы на измерения КС (Y, X) в стационарном режиме. Вторая разновидность обеспечивает повышенное быстродействие за счет применения алгоритма, в котором измерение происходит за период и ориентирована на использование в нестационарных (переходных) режимах ГТД. Кроме того, разработанные системы разделяются по видам и числу измеряемых КС (только радиальные зазоры (P3), или P3 и осевые смещения (OC) лопаток), по виду объекта (компрессор, турбина), по используемым средствам обработки и представления измерительной информации (компьютеры с представлением информации на мониторе, микропроцессоры с индикационным табло в системах в приборном исполнении), по используемым конструктивам [4-7].

На рис. 3 приведена в качестве примера структура одной из наиболее представительных и современных систем – СИ-03-М. Это

16 канальная многопроцессорная система, предназначенная для одновременных измерений на 4 ступенях ГТД, причем на 2 ступенях компрессора производится измерение только P3 (Y), а на двух ступенях турбины – как P3, так и OC (Y, X). Система имеет двухуровневую структуру [5]. На верхнем уровне находится ПЭВМ, на нижнем устройстве связи с объектом в виде Еврокрейта 3U с измерительными и микропроцессорными модулями. Модули в крейте объединены в 4 измерительные процессорные станции (ИПС), каждая из которых обслуживает 4 рабочих ОВТД, установленных на одной из ступеней компрессора или турбины. В состав ИПС входят 3 модуля, объединенные локальной магистралью: процессорный (МП), измерительный (МИ-4), и синхронизации (МС) (эти или аналогичные им модули используются в других СИ, предназначенных не только для испытаний ГТД, но и для испытаний ДВС).

Модуль МС, связанный с ДЧВ, обеспе-



Рис.3. Структура одной из наиболее представительных и современных систем – СИ-03-М

чивает цифровое измерение периода вращения, а совместно с модулем МП - формирование последовательности импульсов питания ОВТД.

Модуль МИ-4 предназначен для преобразования в цифровой код параметров четырех ОВТД и четырех термопар. Термопары, встроенные в датчики, используются для контроля температуры с целью коррекции градуировочных характеристик датчиков. В состав модуля входят мосты Блумлейна и усилители выборки хранения, преобразователи сигналов термопар, АЦП.

ПЭВМ верхнего уровня производит регистрацию всей поступающей от модулей информации и осуществляет расчет физических значений РЗ (в компрессоре), а также РЗ и ОС (в турбине).

Созданы специальные технические средства, обеспечивающие градуировку измерительных каналов разработанных систем по двум координатам при изменении температуры среды до 900°C. Разработана методика градуировки и оценки погрешностей, а также реализующие их программные средства. В результате проведения серии метрологических экспериментов получены оценки погрешностей измерительных каналов систем измерения. Показано, что в каналах с компрессорными датчиками погрешности измерения РЗ составляют около 4% при изменениях температуры до 600°C, а в каналах с турбинными датчиками – около 7% при температуре до 900°C и изменениях ОС в пределах  $\pm 2$  мм.

Разработаны компьютерные магистрально-модульные системы измерения смещений вкладышей в ШП, шеек коленвала в ПКО и поршней в цилиндрах ДВС. Созданы специальные средства, обеспечивающие градуировку измерительных систем по зазорам в подшипниках и разработана методика градуировки, оценки влияющих факторов и погрешностей, а также реализующее их программное обеспечение. Получены оценки основных и дополнительных погрешностей. Показано, что максимальные границы основных погрешностей измерительных каналов не превышают 4.5%. При использовании коррекции температурные погрешности не превышают 3.5% в диапазоне от 20 до 100°C, а по-

грешности, вызванные изменением углового положения коленвала (из за неоднородности магнитных свойств шейки коленвала в ПКО) составляют около 2% в диапазоне от 0 до 360 градусов.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что на точность измерения оказывают влияние специфические особенности и трудности получения градуировочных характеристик. Они связаны, в частности, с отсутствием метрологического оборудования промышленного изготовления, обеспечивающего установку эталонных перемещений по нескольким координатам в широком диапазоне температур. Кроме того, чрезвычайно велика трудоемкость процесса градуировки, которая возрастает с увеличением числа координатных составляющих и мешающих факторов. Сокращение трудоемкости за счет увеличения интервалов интерполяции приводит к ускоренному росту погрешностей. По объективным причинам далеко не всегда удается получить исчерпывающие данные о влиянии всех мешающих факторов и во всем диапазоне измерений. Метрологические эксперименты по определению градуировочных характеристик и оценки точности, выполненные на их основе, показывают сравнительно высокий уровень погрешностей, который может значительно увеличиться в процессе испытаний из-за неучтенных факторов, а также при сужении диапазонов измерений. Поэтому задача повышения достоверности и установления истинности (верификации) результатов измерений остается актуальной. Для ее решения в рассмотренных системах, в состав которых входит ПЭВМ, предусматриваются дополнительные процедуры, включающие моделирование процесса измерения, сравнение и верификацию, а также логические выводы [8].

Моделирование процесса измерения предполагает создание и использование интегрированных моделей объекта, а также средств измерения и обработки с регулируемыми параметрами. Модель объекта, несмотря на значительные упрощения, должна обладать возможностью генерирования правдоподобной совокупности координатных составляющих многомерных перемещений, из-

меняющихся во времени с учетом параметров состояния объекта, режима работы и окружающей среды. Модель средств измерения и обработки должна обеспечивать ввод и вывод измеряемых сигналов, имитировать их искажения, формировать погрешности и функции влияния мешающих факторов.

Предполагается также, что результаты моделирования и результаты измерений на реальном объекте затем сравниваются и на основе сравнения принимаются решения об истинности результатов измерений, т.е. полученные результаты верифицируются.

Сравнение возможно по различным критериям (экстремальным значениям, перегибам функций в соответствующие моменты времени, производным, спектрам и т.д.), а процедуру верификации следует рассматривать как итерационный процесс, предусматривающий изменения параметров моделирования по определенному алгоритму до наилучшего приближения результатов моделирования и эксперимента в пределах заданной точности.

Верификация результатов измерений является первым направлением интеллектуализации СИ МП.

Второе направление связано с определением ФКС – предмета основного интереса пользователей. Часть ФКС можно найти с помощью моделей, другую часть – экспериментально [9]. Однако существуют такие ФКС, оценка которых на моделях или чисто экспериментально связана с практически непреодолимыми трудностями. Единственно приемлемым способом оценки таких ФКС является использование результатов измерения КС с последующим вычитанием ФКС, найденных экспериментально, и ФКС, полученных в результате моделирования.

Между тем, модели поведения объекта являются неизменными компонентами систем измерений с верификацией результатов, а потому очевидна возможность их использования и в системах, в которых определяются ФКС.

Применение моделей объекта в решении измерительных задач, связанных с определением каких-либо параметров объекта, является одним из классификационных призна-

ков систем измерений, базирующихся на знаниях [10, 11].

Оба направления интеллектуализации являются важной перспективой развития систем измерений координатных и факторных составляющих МП на ближайшие годы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Секисов Ю.Н., Райков Б.К., Скобелев О.П., Хритин А.А.* Вихретоковые датчики зазоров с чувствительными элементами в виде отрезка проводника // Приборы и системы управления. - 1996. - №8. – С.27-30.
2. *Вострокнутов Н.Г., Евтихийев Н.Н.* Информационно-измерительная техника (Теоретические основы). М. “Высшая школа”. 1977. 232 с.
3. *Скобелев О.П.* Методы преобразования информации на основе тестовых переходных процессов // Измерения, контроль, автоматизация. 1978. №4 (16). С.11-17.
4. *Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Тулунова В.В., Хритин А.А.* Метод и средства измерения радиальных зазоров в газотурбинных двигателях при нестационарных режимах // Автометрия. - 1998. - №3. С.108-113.
5. *Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Хритин А.А.* Компьютерная мультистробоскопия в измерениях радиальных зазоров газотурбинных двигателей // Автометрия. - 1996. - №5. – С.108-113.
6. *Секисов Ю.Н., Хритин А.А., Скобелев О.П.* Микропроцессорная система измерения зазоров между элементами конструкций машин и механизмов // Приборы и системы управления. - 1996. - №9. –С. 37-39.
7. *Беленький Л.Б., Райков Б.К., Слепнев А.В., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Хритин А.А.* Система измерения параметров многомерного движения в кривошипно-шатунном механизме двигателя внутреннего сгорания. // Приборы и системы управления. - 1998. - №12. –С. 53-56.
8. *Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Хритин А.А.* Система измерения многомерных перемещений, базирующаяся на знаниях // Распределенная обработ-

ка информации: Труды VI международного семинара. - Новосибирск, 1998. – С. 295-299.

9. *Васин Н.Н., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.* Интеллектуализация системы измерения координатных и оценки факторных составляющих многомерных перемещений элементов конструкции силовых установок // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды международной конференции. – Самара, 1999. – С. 242-247.

10. *Finkelstain L.* Intelligent and knowledge based instrumentation – An examination of basic concepts // *Measurement*, 1994, Vol. 14, №1, Pp 23-29.

11. *Finkelstain L.* Measurement and instrumentation science – an analytic review // *Measurement*, 1994, Vol. 14, №1, Pp 3-14.

<sup>1</sup> Радиальные смещения определяют радиальные зазоры, если начало системы отсчета расположено на внутренней поверхности статора.

<sup>2</sup> Кроме ОБТД-К-3(Л) существуют ОБТД-К-3(НС), изготовленные из нержавеющей стали для использования в компрессорах ГТД.

## MEASUREMENT SYSTEMS FOR BLADES AND PISTON ENGINES CONSTRUCTIVE ELEMENTS MULTIDIMENSIONAL DISPLACEMENTS DETERMINATION

© 1999 Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev

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

Measurement problem of coordinate components multidimensional displacements was formulated. The approach to construct the measurement system using single-coil eddy-current sensors with a sensitive element as a piece of conductor is offered. The generalized conceptual model of measurement process is given. The model is expanded by the descriptions of algorithms for data obtaining, transformation, information signal allocation, and for a coordinate components in blades and piston engines determination. Technical and metrological characteristics of the magistral-modular systems to realize the offered approach and algorithms are also given. The ways of such systems intellectual ization to ensure increasing of obtained results reliability and to allow the determination of factor coordinate components of multidimensional displacement are also considered.



## ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В АТМОСФЕРЕ

© 1999 г. Ю.Н. Лазарев

Самарский научный центр РАН

Рассматривается численный метод формирования многоканального номинального и командного управления движением аэрокосмических аппаратов в атмосфере на основе последовательной линеаризации. Приведены процедуры дифференцирования функционалов, конечномерной аппроксимации, учета ограничений на управление и режимы движения, а также способы формирования номинального и командного управления, обсуждены результаты математического моделирования.

### Введение

Освоение космического пространства привело к необходимости разработки многоканальных космических транспортных систем на базе использования крылатых космических аппаратов. Определены три основные технические концепции создания многоканальных космических систем: ракетно-космические системы для выведения орбитальных многоканальных кораблей; многоканальные авиационно-космические системы, использующие дозвуковые самолеты-носители и реализующие горизонтальный старт и посадку; многоканальные воздушно-космические системы, реализующие гиперзвуковые скорости движения в атмосфере. Последней ступенью каждой системы является аэрокосмический аппарат (АА) – летательный аппарат многоканального применения, способный совершать управляемое движение, как в околоземном космическом пространстве, так и в атмосфере и располагающий достаточно большим максимальным значением аэродинамического качества ( $K_{\max} > 1$ ) на гиперзвуковых скоростях движения в атмосфере.

Совершенствование наземных и бортовых вычислительных систем позволяет применять при решении задач управления движением АА в атмосфере все более сложные и универсальные численные методы, в частности, метод последовательной линеаризации – прямой метод поиска в пространстве управлений. Метод сводится к построению

минимизирующей последовательности управлений, требует выполнения большого объема вычислений и реализуется с помощью универсальных цифровых вычислительных машин.

### 1. Постановка задачи управления

Общая задача управления АА при движении в атмосфере заключается в определении параметров траектории и характеристик аппарата (задачи навигации и идентификации), а также формировании управления движением центра масс (задача наведения) и относительно центра масс (задачи ориентации и стабилизации). В процессе управления все эти задачи решаются одновременно. Навигационная информация является необходимой для решения задачи наведения, в результате решения которой формируются управляющие зависимости по каналам управления движением центра масс АА. Реализация этих зависимостей осуществляется в результате решения задач ориентации и стабилизации. При разработке систем управления движением АА задачи навигации и идентификации, наведения, ориентации и стабилизации рассматриваются отдельно. Из общей задачи управления выделим для дальнейшего рассмотрения задачу наведения, от решения которой во многом зависит степень использования возможностей АА при движении в атмосфере, точность управления и надежность выполнения маневров. Погрешности решения задач

навигации и идентификации, ориентации и стабилизации не должны заметно ухудшать качество управления траекторией. В статье под управлением будем понимать процесс формирования управления движением центра масс АА.

Решение задачи управления АА проводится в два этапа. На первом этапе, до начала движения, формируется номинальное (расчетное) управление, обеспечивающее достижение цели управления в соответствии с выбранными моделями движения. На втором этапе, во время движения, на основе номинального формируется командное (реальное) управление, обеспечивающее выполнение целевой задачи в реальных условиях. Как номинальное, так и командное управление движением АА формируются с учетом ограничений на управление, параметры траектории и характеристики конструкции.

Управление движением центра масс АА в атмосфере эффективно осуществляется путем изменения угла атаки, угла скоростного крена и тяги двигательной установки (ДУ). Небольшие значения угла скольжения и тяга двигателей ориентации не оказывают существенного влияния на траекторию движения в атмосфере.

Общая техническая постановка задачи управления формулируется следующим образом. Известны характеристики АА, начальные условия движения и цель управления. Требуется сформировать номинальное и командное управление движением в атмосфере по каналам угла атаки, угла скоростного крена и тяги ДУ с учетом ограничений на управление, режимы движения и параметры траектории и оптимизирующее выбранный критерий качества управления.

Рассматриваемая задача управления имеет следующую математическую формулировку. Задана математическая модель движения в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (1)$$

с начальным условием

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \quad (2)$$

где  $\mathbf{f} = (\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_n)$  - вектор-функция пра-

вых частей размерности  $\mathbf{n}$ ,

$\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n)$  - вектор фазовых координат размерности  $\mathbf{n}$ ,

$\mathbf{u} = (\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_r)$  - вектор управляющих воздействий размерности  $\mathbf{r}$ .

Требуется определить управление  $\mathbf{u}(t)$  на отрезке времени  $[0, T]$  для системы (1) с начальным условием (2), удовлетворяющее ограничениям на управление

$$\mathbf{u}(t) \in U, \quad \dot{\mathbf{u}}(t) \in \dot{U} \quad (3)$$

при всех  $t \in [0, T]$ ,

ограничениям на функционалы

$$\mathbf{F}_j[\mathbf{u}(t)] \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

и минимизирующее функционал

$$\mathbf{F}_0[\mathbf{u}(t)]. \quad (5)$$

Функционалы  $\mathbf{F}_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) рассматриваются как неявные зависимости управляющих воздействий  $\mathbf{u}(t)$ , поэтому в общем случае запись  $\mathbf{F}_j[\mathbf{u}(t)]$  выражает принципиальную возможность вычислить  $\mathbf{F}_j$  по известной зависимости  $\mathbf{u}(t)$ .

## 2. Метод последовательной линеаризации

Метод последовательной линеаризации предназначен для формирования приближенно-оптимального управления при наличии ограничений на функционалы задачи и управляющие зависимости. Метод является типичным методом спуска в пространстве управлений и сводится к построению минимизирующей последовательности управлений. Подробное описание метода последовательной линеаризации, а также вопросов, связанных с его численной реализацией, приведены в [1]. Модификации метода, разработки по его применению в задачах формирования управления движением АА в атмосфере и результаты решения конкретных задач описаны в [2-6].

Метод последовательной линеаризации состоит в построении последовательности

итераций улучшения управления. Сначала задается начальное приближение опорного управления  $\mathbf{u}(t)$ , которое затем последовательно улучшается в процессе поиска с целью удовлетворения всем условиям задачи (3) – (5). При этом на каждой итерации вычисляется малое конечное приращение  $\delta\mathbf{u}(t)$  опорного управления  $\mathbf{u}(t)$ , позволяющее перейти к новому улучшенному управлению  $\mathbf{u}(t) + \delta\mathbf{u}(t)$ .

Если имеется некоторое опорное управление  $\mathbf{u}(t)$ , то расчет приращения  $\delta\mathbf{u}(t)$  осуществляется следующим образом.

1. Интегрируется система (1) с опорным управлением  $\mathbf{u}(t)$ . Вычисляется опорное решение  $\mathbf{x}(t)$  и функционалы задачи  $F_j$  ( $j = 0, 1, \dots, m$ ).

2. Для опорного закона движения  $\{\mathbf{u}(t), \mathbf{x}(t)\}$  вычисляются функциональные производные  $\omega^{(j)}(t)$  от функционалов  $F_j$  по управлению  $\mathbf{u}(t)$ :

$$\omega^{(j)}(t) = \frac{\partial F_j[\mathbf{u}(t)]}{\partial \mathbf{u}(t)}, \quad (j = 0, 1, \dots, m). \quad (6)$$

3. Вводится малая окрестность  $\delta U$  опорного управления  $\mathbf{u}(t)$ . При этом должны выполняться следующие условия:

во-первых, окрестность  $\delta\mathbf{u}$  опорного управления  $\mathbf{u}(t)$  должна входить в допустимую область изменения управления  $U$ , то есть  $\mathbf{u}(t) + \delta\mathbf{u}(t) \in U$ ;

во-вторых, в окрестности  $\delta U$  приращения функционалов  $\Delta F_j$  ( $j = 0, 1, \dots, m$ ) должны с достаточной точностью описываться формулами первого порядка

$$\Delta F_j \approx \delta F_j[\delta\mathbf{u}(t)] = \int_0^T \omega^{(j)}(t) \delta\mathbf{u}(t) dt;$$

в-третьих, окрестность  $\delta U$  должна быть не слишком малой, чтобы обеспечить

быстроту процесса перехода от начального приближения опорного управления к искомому, удовлетворяющему условиям задачи (3) – (5).

4. Определяется приращение  $\delta\mathbf{u}(t)$ , являющееся решением линейного приближения исходной задачи (3) – (5) в окрестности опорного закона движения  $\{\mathbf{u}(t), \mathbf{x}(t)\}$ . В соответствии с этим  $\delta\mathbf{u}$  должно удовлетворять следующим условиям:

$$\delta\mathbf{u}(t) \in \delta U \quad \text{при всех } t \in [0, T], \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F_j[u(t)] + \delta F_j[\delta u(t)] = \\ = F_j[u(t)] + \int_0^T \omega^{(j)}(t) \delta u(t) dt \leq 0, \\ (j = 1, \dots, m), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\min_{\delta\mathbf{u}(t)} \delta F_0[\delta\mathbf{u}(t)] = \min_{\delta\mathbf{u}(t)} \int_0^T \omega^{(0)}(t) \delta\mathbf{u}(t) dt \quad (9)$$

5. Проверяется выполнение условий окончания поиска. Если полученное улучшенное управление  $\mathbf{u}(t) + \delta\mathbf{u}(t)$  удовлетворяет всем условиям исходной задачи (3) – (5), то поиск искомого управления считается законченным. Если условия не выполняются, то выполняется следующая итерация улучшения управления, начиная с пункта 1. В качестве опорного принимается улучшенное управление  $\mathbf{u}(t) + \delta\mathbf{u}(t)$ .

### 3. Способ дифференцирования функционалов

Основным инструментом теоретического анализа задач оптимального управления и разработки численных методов их приближенного решения является способ вычисления производных (6) от входящих в постановку задачи функционалов по управлению. На информации о значениях функциональных производных основан переход к улучшенному управлению при выполнении итерации метода последовательной линеаризации.

Существует процедура [1] дифференцирования функционалов, определенных на траекториях управляемой системы, вида

$$F[u(t)] = \int_0^T \Phi[x(t), u(t)] dt, \quad (10)$$

$$F[u(t)] = \Phi[x(t')], \quad (11)$$

где  $\Phi$  - заданная достаточно гладкая функция своих аргументов;

$t'$  - заданная точка на  $[0, T]$ .

Функционалы вида (10), (11) называются дифференцируемыми в смысле Фреше.

Часто встречающиеся в задачах управления функционалы вида

$$F[u(t)] = \max_t \Phi[x(t), u(t)] \quad (12)$$

$$F[u(t)] = \int_0^T \Phi[x(t), u(t)] dt \quad (13)$$

не имеют производных Фреше и дифференцируемы по направления в функциональном пространстве (по Гато) [1]. При численном решении задач функционалы, дифференцируемые по Гато, заменяются одним или аппроксимируются несколькими функционалами, дифференцируемыми по Фреше.

Способ дифференцирования функционалов вида (10), (11) сводится к расчету по следующим соотношениям.

Элементы матрицы  $\omega(t)$  частных производных  $m$  функционалов по  $r$  управляющим воздействиям размерности  $r \times m$  вычисляются по формуле

$$\omega(t) = f_u(t)\psi(t) + \Phi_u, \quad (14)$$

где  $f_u(t) = f_u[x(t), u(t)]$  сопряженная матрица размерности  $r \times n$  частных производных правых частей уравнений (1) по  $u$ ;

$\Phi_u$  - матрица размерности  $r \times m$  частных производных функций  $\Phi$  по  $u$ .

Элементы матрицы сопряженных переменных  $\Psi$  размерности  $n \times m$  являются решением сопряженной системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{\Psi} = -f_x(t)\psi(t) - Y(t), \quad (15)$$

где  $f_x(t) = f_x[x(t), u(t)]$  - сопряженная матрица размерности  $n \times n$  частных производных правых частей уравнений (1) по фазовым координатам  $x$ ;

$Y(t)$  - матрица размерности  $n \times m$ .

Для функционалов вида (10)

$Y(t) = \Phi_x(t)$ , где  $\Phi_x$  - сопряженная матрица размерности  $n \times m$  частных производных функций  $\Phi$  по фазовым координатам  $x$ .

Система уравнений (15) интегрируется справа налево с граничным условием  $\Psi(T) = 0$ .

Для функционалов вида (11)  $Y(t) = 0$ ,

$\Phi_u = 0$ , а система (15) интегрируется справа налево с граничным условием  $\Psi(t') = \Phi_x(t')$ , причем  $\Psi(t) \equiv 0$  при  $t' \leq t \leq T$ .

В задачах формирования управления движением АА в атмосфере большое значение имеют функционалы вида

$$F[u(t)] = \int_0^{t'} \Phi[x(t), u(t)] dt, \quad (16)$$

с помощью которых задаются ограничения на фазовые координаты и режимы движения в любой точке траектории.

Для этих функционалов элементы матрицы функциональных производных и сопряженных переменных вычисляются в соответствии с (14) и (15), причем  $Y(t) = \Phi_x(t)$ . Система (15) интегрируется справа налево с граничным условием  $\Psi'(t) = 0$ , причем  $\Psi(t) \equiv 0$  при  $t' \leq t \leq T$ .

#### 4. Конечномерная аппроксимация задачи

Численная реализация метода последовательной линеаризации осуществляется с использованием конечномерной аппроксимации, которая позволяет процесс улучшения управления свести к последовательному решению стандартных задач линейного программирования, математический аппарат которого позволяет эффективно решать задачи с ограничениями.

При выполнении итерации улучшения управления методом последовательной линеаризации исходная задача преобразуется в конечномерную вследствие замены дифференциальных уравнений движения (1) конеч-

но-разностными при их численном интегрировании. В процессе численного интегрирования на отрезке времени  $[0, T]$  располагаются точки  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) - узлы, которым соответствует вся необходимая информация для решения линейного приближения задачи (7) – (9).

После расположения узлов  $t_i$  в этих точках вычисляются значения фазовых координат  $x_i$ , сопряженных переменных  $\psi_i$  и функциональных производных  $\omega_i$ , а также фиксируются значения управляющих зависимостей  $u_i$ . В дальнейшем эти величины используются при аппроксимации зависимостей от времени фазовых координат, сопряженных переменных, функциональных производных и управляющих воздействий. Таким образом непрерывная задача (7) – (9) преобразуется в конечномерную, пригодную для численного решения.

В результате конечномерной аппроксимации на каждой итерации улучшения управления условия (7) – (9) представляются в форме стандартной задачи линейного программирования. Для этого все используемые зависимости, представленные конечным набором значений в узлах, аппроксимируются по определенному правилу.

Процедура расчета итерации улучшения опорного управления при кусочно-линейной аппроксимации зависимостей формируется на основании следующих соотношений.

Управление  $u(t)$  представляет собой вектор-функцию размерности  $r$ . Пусть каждый компонент  $u^{(k)}$  ( $k = 1, 2, \dots, r$ ) опорного управления  $u(t)$  аппроксимирован кусочно-линейной функцией со значениями  $u_i^{(k)}$  в узловых точках  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ). В дальнейшем индекс " $k$ " не будет указываться, и под управлением  $u(t)$  будем понимать или вектор-функцию размерности  $r$  или ее  $k$ -й компонент.

Тогда  $k$ -й компонент управления  $u(t)$ ,

представленный в классе кусочно-линейных функций, в каждый момент времени  $t$  может быть рассчитан по формуле

$$u(t) = u_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{t_{i+1} - t_i} (t - t_i),$$

$$t_i \leq t \leq t_{i+1}, \quad (i = 1, \dots, (N - 1)).$$

Возмущение  $\delta u(t)$  каждого  $k$ -того компонента управления  $u(t)$ , представленное в том же классе функций, имеет вид

$$\delta u(t) = \delta u_i + \frac{\delta u_{i+1} - \delta u_i}{t_{i+1} - t_i} (t - t_i),$$

$$t_i \leq t \leq t_{i+1}, \quad (i = 1, \dots, (N - 1)),$$

где  $\delta u_i, \delta u_{i+1}$  - постоянные величины, представляющие собой вариации непрерывного кусочно-линейного управления в узловых точках.

При этих допущениях условия (7) – (9) приводятся к следующей задаче линейного программирования относительно неизвестных  $\delta u_1, \dots, \delta u_N$ :

$$\delta u_i^- \leq \delta u_i \leq \delta u_i^+ \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (17)$$

$$F_j + \sum_{i=1}^N \delta u_i h_i^{(j)} \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m), \quad (18)$$

$$\min_{\delta u_i} \sum_{i=1}^N \delta u_i h_i^{(0)}, \quad (19)$$

где  $F_j$  - значения функционалов, вычисленные для опорного закона движения  $\{u(t), x(t)\}$ ;

$\delta u_i^+, \delta u_i^-$  - малые заданные величины.

Коэффициенты  $h^{(j)}$  вычисляются по интегральным соотношениям [2]. Если известны значения функциональных производных  $\omega^{(j)}$  в узлах  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), то, используя кусочно-линейную аппроксимацию зависимостей  $\omega^{(j)}(t)$ , можно получить формулы для вычисления коэффициентов  $h^{(j)}$  в узлах аппроксимации [3].

В зависимости от сложности или этапа

решения задачи узлы аппроксимации могут располагаться равномерно по времени, равномерно по специальным функциям или в соответствии с методами, обеспечивающими оптимальное распределение [2-6].

### 5. Учет ограничений на управление

В задачах управления движением АА в атмосфере учитываются ограничения на величину и скорость изменения управляющих воздействий. На каждой итерации поиска методом последовательной линеаризации после вычисления улучшенных значений управления  $\mathbf{u}_i$  выполняются следующие операции.

Сначала последовательно проверяется, начиная с первого узла, выполнение неравенств:  $\mathbf{u}_{i\min} \leq \mathbf{u}_i \leq \mathbf{u}_{i\max}$  ( $i = 1, \dots, N$ ). В узлах, в которых эти ограничения не выполняются, значения управляющих зависимостей заменяются на  $\mathbf{u}_{i\min}$  или  $\mathbf{u}_{i\max}$ . Затем последовательно проверяется, начиная с интервала между первым и вторым узлом, выполнение неравенств:

$$\dot{\mathbf{u}}_{i\min} \leq |(\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_i) / (t_{i+1} - t_i)| \leq \dot{\mathbf{u}}_{i\max} \quad (i = 1, \dots, N - 1).$$

Значения  $\dot{\mathbf{u}}_{i\min}$  и  $\dot{\mathbf{u}}_{i\max}$  соответствуют интервалу  $(i, i + 1)$ . На интервалах, на которых эти ограничения не выполняются, производится замена значений управляющих зависимостей в конце интервала.

Если  $\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_i > 0$ , то

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i + \dot{\mathbf{u}}_{i\max} (t_{i+1} - t_i) \quad \text{или}$$

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i + \dot{\mathbf{u}}_{i\min} (t_{i+1} - t_i).$$

Если  $\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_i < 0$ , то

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i - \dot{\mathbf{u}}_{i\max} (t_{i+1} - t_i) \quad \text{или}$$

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i - \dot{\mathbf{u}}_{i\min} (t_{i+1} - t_i).$$

### 6. Учет ограничений на максимальные значения параметров

При формировании управления движением АА в атмосфере одновременно учитываются ограничения на несколько функционалов вида (12). Процедуры аппроксимации [1] этих функционалов основаны на замене одного функционала (12) несколькими вида (11). Чтобы не увеличивать число функционалов, предлагается заменять каждый из функционалов вида (12) одним функционалом вида (11).

На каждой итерации улучшения управления для  $m_1 \leq m$  функционалов вида (12) фиксируются моменты времени  $t'_{i1}$  ( $i1 = 1, \dots, m1$ ), соответствующие узлам  $\mathbf{n}^{(i1)}$ , в которых функционалы достигают экстремальных значений. Функционалы рассматриваются как функционалы вида (11). Решается задача линейного программирования относительно  $\delta \mathbf{u}_i$ .

В задачах с одним функционалом вида (12), который явно зависит от управления, дополнительно в узлах  $\mathbf{n} - 1$ ,  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{n} + 1$  принимается:

$$\delta \mathbf{u}_{n-1} = \delta \mathbf{u}_n = \delta \mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{K} \delta \mathbf{U} \text{sign}(\mathbf{h}_n),$$

где  $\mathbf{K} > 1$  - коэффициент увеличения малой окрестности опорного управления. Вследствие этого увеличивается скорость изменения функционала и учитывается возможное изменение номера контролируемого узла на следующей итерации поиска.

### 7. Формирование номинального управления

Номинальное управление формируется в условиях практически неограниченного времени, поэтому вычислительный алгоритм может содержать заранее не определенное число операций. При этом учитываются ограничения на управление, терминальные условия, текущие параметры траектории и может решаться задача оптимизации.

Использование метода последовательной линеаризации сводится к выбору исходного управления, конечномерной аппроксимации задачи, вычислению функционалов и их производных по управлению, решению задачи линейного про-

граммирования и формированию улучшенного управления, которое принимается в качестве номинального, если удовлетворяются все условия задачи. В противном случае процедура повторяется, в качестве опорного управления принимается улучшенное. Полученное номинальное управление является функцией времени.

При формировании номинального управления можно использовать приемы повышения эффективности поиска: временное “замораживание” расположения узлов аппроксимации; отдельный поиск управления по каждому из каналов; временное снятие контроля за изменением одного или нескольких функционалов; изменение размеров области допустимых значений приращений управляющих зависимостей; прерывание процесса поиска, возврат к результатам, полученным ранее, изменение параметров вычислительного алгоритма и продолжение поиска.

## 8. Формирование командного управления

Командное управление формируется в реальном времени, поэтому вычислительный алгоритм содержит заранее определенное число операций. Командное управление тем больше отличается от номинального, чем больше реальные условия движения не совпадают с условиями моделирования при формировании номинального.

Работоспособность командного управления в условиях априорной неопределенности возмущающих воздействий обеспечивается наличием обратной связи. Применение многошагового управления [7] позволяет при использовании на каждом отдельном шаге метода, формирующего управление как функцию времени, осуществлять в целом обратную связь, регулярно замыкая систему управления. Командное управление формируется к концу каждого шага по результатам прогнозирования движения аппарата на основе информации, имеющейся к его началу. При прогнозировании используется информация о значениях фазовых координат, параметров аппарата, характеристик атмосферы и сформированное ранее управление.

При использовании метода последовательной линеаризации на каждом шаге выполняются те же операции, что и при формировании номинального управления, однако число итераций улучшения управления определяется заранее. В качестве исходного принимается управление, сформиро-

ванное на предыдущем шаге (на первом шаге принимается номинальное управление).

## 9. Математическое моделирование

Математическое моделирование проводилось на всех стадиях разработки численного метода формирования управления движением АА и выполнило три основные задачи. Во-первых, математическое моделирование явилось необходимым этапом при разработке самого численного метода. Это связано с необходимостью как отработки и совершенствования вычислительных процедур в процессе решения конкретных задач, так и выработки рекомендаций для выбора численных значений параметров этих процедур.

Во-вторых, на результатах математического моделирования основывалось подтверждение работоспособности и эффективности разработанного метода формирования многоканального номинального и командного управления движением АА в атмосфере. Математическое моделирование позволило отработать методику применения численного метода для различных классов задач.

В-третьих, в процессе математического моделирования решены новые задачи управления движением АА в атмосфере. Этот результат использования разработанного численного метода имеет самостоятельное значение, поскольку полученные результаты свидетельствуют о больших возможностях АА при совершении сложных маневров, в том числе и при возникновении нештатных ситуаций.

Результаты решения конкретных задач формирования номинального и командного управления движением АА при спуске в атмосфере, при возникновении нештатной ситуации на траектории выведения АА на орбиту спутника Земли, а также при изменении наклона плоскости орбиты АА в атмосфере с использованием численного метода на основе последовательной линеаризации приведены в [3-6]. Во всех задачах аэродинамические характеристики и плотность атмосферы задавались таблично. Модель движения учитывала нецентральность поля тяготения Земли и ее вращение вокруг собственной оси. В описание результатов решения включены сведения, характеризующие физическую сторону полученных конечных результатов, а также данные о ходе решения, характеризующие эффективность используемых численных методов и алгоритмов.

При проведении численного моделирования решались два типа задач. К первому типу относятся задачи формирования номинального управления, имеющие известное решение. На сравнении результатов, полученных с использованием численного метода на основе последовательной линеаризации, с известными решениями тех же задач, полученными с помощью принципа максимума, построено, в первом приближении, доказательство практической применимости разработанного метода.

Ко второму типу относятся новые, более сложные задачи формирования номинального и командного управления. Доказательство эффективности разработанного численного метода и способов формирования номинального командного управления основывается на результатах решения различных конкретных задач, содержащих ограничения на фазовые координаты, режимы движения и управление.

### Заключение

Результаты решения задач управления, сравнение их с результатами решения тех же задач с использованием принципа максимума, а также результаты решения новых задач позволяют сделать вывод о работоспособности и эффективности разработанного численного метода на основе последовательной линеаризации при решении задач формирования управления движением АА в атмосфере.

Достоинствами метода являются малая чувствительность к исходному управлению, возможность учета разнообразных ограничений, возможность контроля за процессом поиска и влияния на него, относительная простота перенастройки вычислительных процедур при изменении условий задачи, в том числе при появлении дополнитель-

ных ограничений. Практика применения численного метода на основе последовательной линеаризации позволяет охарактеризовать его как универсальный подход к решению широкого круга задач управления движением АА в атмосфере.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978.
2. Голубев Ю.Ф., Хайруллин Р.З. К решению задач оптимального управления при входе в атмосферу // Космические исследования. 1987. Т.25. Вып. 1. С.37.
3. Лазарев Ю.Н. Решение задач формирования программ управления движением в атмосфере аэрокосмических аппаратов на основе последовательной линеаризации // Космические исследования. 1994. Т.32. Вып.4-5. С.83.
4. Лазарев Ю.Н. Управление движением аэрокосмического аппарата в атмосфере на основе метода последовательной линеаризации // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 1996. N 2. С.134.
5. Лазарев Ю.Н. Области достижимости и управление движением в атмосфере аэрокосмического аппарата в нештатной ситуации // Космические исследования. 1996. Т.34. Вып.4. С.434.
6. Балакин В.Л., Лазарев Ю.Н., Филиппов Е.А. Оптимизация управления аэрокосмическим аппаратом при изменении в атмосфере наклона плоскости орбиты // Космические исследования. 1996. Т.34. Вып.2. С.190.
7. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Г. Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. М.: Наука, 1975.

## NUMERICAL METHOD TO FORM MULTI-CHANNEL CONTROL FOR AEROSPACE VEHICLES MOTION IN ATMOSPHERE

© 1999 Yu.N. Lazarev

Samara Science Centre of Russian Academy of Sciences

A numerical method to form multi-channel nominal and commanding control for aerospace vehicles motion in atmosphere is considered in this paper. The method is based on sequential linearization. Methods of functionals differentiation, finite-dimensional approximation, registration of control limitations and motion modes, and the ways to form nominal and commanding control are presented. The results of mathematical simulation are also discussed in this paper.