

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ СИСТЕМАМИ

В.Н. Бурков, Д.А. Новиков

Приведена классификация задач управления активными системами, дан краткий обзор основных теоретических результатов, описан опыт практического применения прикладных моделей и указаны перспективные направления исследований.

Введение

В конце 1960-х г.г., на фоне бурного развития математической теории управления и интенсивного внедрения ее результатов при создании новых и модернизации существующих технических систем, практически одновременно во многих научных центрах как в СССР, так и за рубежом, начали предприниматься попытки применения общих подходов теории управления для разработки математических моделей социальных и экономических систем. Специфика последних заключается в том, что составляющие их элементы (человек, группа, коллектив и т.д.), в отличие от элементов технических систем, обладают активностью - способностью к целенаправленному поведению, т.е. к выбору действий в соответствии с собственными предпочтениями и интересами. Человек может, например, если ему это выгодно, сообщить данные, не соответствующие истинному положению дел; может сознательно пойти на невыполнение данных обещаний, опять же, если это соответствует его интересам и т.п.

Следовательно, при выборе управляющих воздействий необходимо предсказывать возможные реакции управляемых субъектов и использовать такие механизмы принятия управленческих решений, которые позволяли бы максимально учитывать и согласовывать интересы управляющего органа и управляемых субъектов. Круг задач организационного управления, в которых используются подобные механизмы чрезвычайно широк – от управления технологическими процессами до принятия решений на уровне регионов и стран. Примерами могут служить процедуры оценки деятельности структурных подразделений; механизмы мотивации (стимулирования), побуждающие управляемых субъектов предпринимать определенные действия в интересах управляющего органа; процедуры распределения материальных и финансовых ресурсов на основании информации об эффективности их использования, предоставленной претендентами на получение ресурсов, и др. (см. ниже более подробно).

Одним из направлений исследований, учитывающих при анализе и синтезе моделей и механизмов управления целенаправленность поведения участников социально-экономической (активной) системы, стала теория активных систем, основным центром зарождения и развития которой является Институт проблем управления РАН (бывший Институт автоматики и телемеханики).

Теория активных систем (ТАС) - раздел теории управления социально-экономическими системами, изучающий свойства механизмов их функционирования, обусловленные проявлениями активности участников системы. Основным методом исследования является математическое (теоретико-игровое) и имитационное моделирование. По основным своим подходам и используемым методам исследований ТАС чрезвычайно тесно связана с такими разделами теории управления социально-

экономическими системами как: теория иерархических игр (или информационная теория иерархических систем) [1, 2]; теория контрактов, развиваемая в основном зарубежными учеными и исследующая задачи стимулирования в условиях вероятностной неопределенности - см. обзоры [3, 4] и монографию [5]); теория реализуемости (также развиваемая в основном зарубежными учеными и исследующая задачи реализуемости соответствий группового выбора механизмами планирования, а также их свойства - неманипулируемость и др. - см. обзоры [4, 6]) и др.

Среди нескольких сотен публикаций по ТАС выделим монографии, содержащие полное и систематическое изложение текущих результатов [7...15], а также учебные пособия, ориентированные на студентов ВУЗов, аспирантов и слушателей системы повышения квалификации [16...18]. Обзор современного состояния ТАС, а также полная библиография приведены в работе [19].

Настоящая работа преследует следующую цель - кратко охарактеризовать круг задач, решаемых в ТАС, с тем, чтобы заинтересованный читатель имел возможность более свободно в них ориентироваться и находить ссылки на работы, максимально близкие к конкретной области его научных и практических интересов. В силу ограниченного объема мы были вынуждены практически отказаться от описания собственно результатов исследований, ограничиваясь краткими описаниями постановок задач и в большинстве случаев лишь качественным обсуждением существующих моделей - достаточно полное изложение самих результатов приведено в работах, на которые указывают соответствующие ссылки.

1. Модель активной системы и общая постановка задачи управления

Рассмотрим задачу управления некоторой (пассивной или активной) системой. Пусть *состояние системы* описывается переменной $y \in \hat{A}$, принадлежащей допустимому множеству A . Состояние системы в некоторый момент времени зависит от *управляющих воздействий* $u \in U$: $y = F(u)$. Предположим, что на множестве $U \times A$ задан функционал $F(u, y)$, определяющий *эффективность функционирования* системы. Величина $K(u) = F(u, F(u))$ называется *эффективностью управления* $u \in U$. Тогда задача управляющего органа заключается в выборе такого допустимого управления, которое максимизировало бы значение его эффективности при условии, что известна реакция системы $F(u)$ на управляющие воздействия: $K(u) \rightarrow \max_{u \in U}$.

Рассмотрим теперь различия в моделях управления пассивными и активными системами. Для *пассивной* (технической, формальной и т.д.) *системы* зависимость $y = F(u)$ является, фактически, моделью системы - управляемого объекта, отражающей законы и ограничения ее функционирования. Например, для динамической системы эта зависимость может являться решением системы дифференциальных уравнений, для некоторого черного ящика - быть результатом экспериментов и т.д. Общим для всех пассивных систем является их "детерминизм" с точки зрения управления - не в смысле отсутствия неопределенности, а в смысле отсутствия у управляемого объекта свободы выбора своего состояния и возможности прогнозирования поведения управляющего органа.

Иначе обстоит дело в *активных системах* (АС), т.е. системах, в которых управляемые субъекты (точнее говоря, хотя бы один субъект) обладают свойством активности, включая свободу выбора своего состояния. Помимо возможности выбора состояния, элементы АС обладают собственными интересами и предпочтениями, т.е.

осуществляют выбор состояния целенаправленно (в противном случае их поведение можно было бы рассматривать как пассивное). Соответственно конкретизируется и модель системы $F(x)$, которая должна учитывать проявления активности управляемых субъектов. Эти проявления описываются следующим образом - считается, что управляемые субъекты стремятся к выбору таких своих состояний, которые являются наилучшими с точки зрения их предпочтений при заданных управляющих воздействиях, а управляющие воздействия, в свою очередь, зависят от состояний управляемых субъектов. Одно из важнейших проявлений активности заключается в способности управляемых субъектов «предсказывать» (в рамках имеющейся информации) поведение управляющего органа – его реакцию на состояние системы и т.д.

Если управляющий орган имеет модель реальной АС, которая адекватно описывает ее поведение, то *задача управления АС* (задача синтеза оптимального управляющего воздействия) сводится к сформулированной выше - выбрать оптимальное управление $u^* = \tilde{y}(y) \hat{I} U$, т.е. допустимое управление, максимизирующее эффективность.

Закончив краткое качественное обсуждение постановки задачи управления в пассивных и активных системах, перейдем к более детальному описанию собственно *модели активной системы*. Перечислим параметры, определяющие конкретную модель АС [4, 19]. Основные значения признаков классификации по различным основаниям приводятся ниже. В рамках каждого из значений признаков возможна более детальная иерархическая классификация.

1. Состав АС: число АЭ - *одноэлементные и многоэлементные АС* (см. более подробно [4, 7 – 9]).

2. Структура АС: число уровней иерархии - *двухуровневые, трехуровневые* [14] и др. АС; подчиненность АЭ - АС с *унитарным контролем* (веерного типа, в которых структура подчиненности имеет вид дерева, т.е. каждый АЭ подчинен одному и только одному управляющему органу) и АС с *распределенным контролем* (в которых АЭ может быть подчинен одновременно нескольким управляющим органам); взаимозависимость показателей деятельности, функций выигрыша и индивидуальных управлений АЭ - *независимые АЭ, слабо связанные АЭ, сильно связанные АЭ* (см. более подробно [5, 13, 14]).

3. Характер функционирования: *статические* (участники АС выбирают стратегии однократно) и *динамические АС*. Динамические АС, в зависимости от взаимосвязи периодов функционирования и учета участниками АС влияния последствий принимаемых решений на будущие периоды функционирования, могут в свою очередь подразделяться на АС с *дальновидными и недальновидными АЭ, адаптивные и неадаптивные АС* и т.д. (см. более подробно [2, 4, 6, 12, 15]).

4. Целевые функции участников системы определяют конкретный тип задачи управления, которая может формулироваться для данной модели. Например, задача стимулирования, задача планирования и т.д. [12, 17, 18].

5. Допустимые множества - независимые или взаимозависимые множества возможных выборов (состояний) участников АС; размерность пространства индивидуальных состояний АЭ и планов - АЭ со *скалярными и векторными предпочтениями* (см. более подробно [12, 14]).

6. Порядок функционирования: в первом приближении достаточно выделить *стандартный и нестандартный порядок функционирования*. Стандартный порядок

функционирования соответствует, например, базовой модели, описанной выше [2, 5, 18].

7. Информированность участников - основание классификации, по которому предложено наибольшее число значений признаков и, соответственно, наибольшее число подклассификаций. Наиболее грубым является разделение АС на АС с симметричной (одинаковой) и асимметричной информированностью участников (в первую очередь важно определить различие в информированностях АЭ и центра), а также на детерминированные АС и АС с неопределенностью. В свою очередь АС с неопределенностью могут классифицироваться по следующим основаниям (см. более подробно [5]).

7.1. Тип неопределенности: внутренняя неопределенность (относительно параметров самой АС – целевых функций, допустимых множеств или и того и другого); внешняя неопределенность (относительно параметров окружающей среды, т.е. внешних по отношению к АС) и смешанная неопределенность (для части участников АС - внутренняя, для других - внешняя; или обеих типов).

7.2. Вид неопределенности: интервальная (когда участнику АС известно множество возможных значений неопределенного параметра), вероятностная (известно вероятностное распределение - вероятностные АС) и нечеткая (известна функция принадлежности - нечеткие АС) неопределенность, а также смешанная неопределенность (все возможные комбинации перечисленных видов неопределенности для различных участников).

7.3. Принципы поведения участников АС (в том числе методы устранения неопределенности): использование метода максимального гарантированного результата, ожидаемых полезностей, максимально недоминируемых альтернатив, сообщения информации; выбор структуры системы и т.д.

Перечисленные параметры определяют механизм функционирования (управления) АС в широком смысле - совокупность законов, правил и процедур взаимодействия участников системы. В узком смысле механизм управления представляет собой совокупность правил принятия решений участниками АС при заданных ее составе, структуре и т.д. (например, правило принятия решений центром – зависимость $\tilde{y}(y)$, ставящая соответствие состояниям АЭ конкретное значение управляющего воздействия). Умея решать задачу синтеза механизма управления в узком смысле, можно решать задачи синтеза оптимального состава участников АС, ее структуры и т.д., т.е. задачи синтеза механизма управления в широком смысле.

Рассмотрим базовую модель активной системы, состоящей из центра и n активных элементов, функционирующих в условиях полной информированности обо всех существенных внешних и внутренних по отношению к системе параметрах (детерминированная АС). Теоретико-игровая формулировка задачи управления

заключается в следующем. Пусть $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ $\hat{I} A = \prod_{i=1}^n A_i$ – вектор

действий активных элементов, компоненты которых они могут выбирать независимо (гипотеза независимого поведения (ГНП)). Если ГНП не выполнена, т.е. существуют общие (глобальные) ограничения на выбираемые АЭ состояния, то сначала решают задачу управления в рамках ГНП, а затем исследуют реализуемость состояний с точки зрения глобальных ограничений.

Предположим, что целевая функция i -го АЭ $f_i(y, u)$, отражает его предпочтения на множестве $A \times U$. Определим $P(u)$ - множество решений игры АЭ как множество равновесных при заданном управлении $u \in U$ стратегий АЭ. В одноэлементной АС

$P(u)$ является множеством точек максимума целевой функции АЭ, в многоэлементных системах - множеством равновесий (в максиминных стратегиях, или доминантных стратегиях, или равновесий Нэша, Байеса, Штакельберга и т.д. - в зависимости от конкретной задачи [18]). Множество решений игры отражает предположения центра (исследователя операций) о поведении управляемых субъектов (активных элементов) при заданном управлении. Далее, центр, интересы которого идентифицируются с интересами АС в целом и на позициях которого находится исследователь операций, должен конкретизировать свои предположения о стратегиях, выбираемых элементами из множества решений игры. Наиболее часто применяются два "предельных" подхода - метод *максимального гарантированного результата*, при котором центр рассчитывает на наихудший для него выбор АЭ, и *гипотеза благожелательности*, в рамках которой АЭ выбирают из множества решений игры наиболее предпочтительные с точки зрения центра действия. Далее по умолчанию будем считать выполненной гипотезу благожелательности. При этом *задача управления АС* заключается в поиске допустимого управления, максимизирующего целевую функцию центра: $u^* \hat{I} \text{Arg} \max_{u \in U} \max_{y \in P(u)} F(u, y)$, т.е. управления, имеющего максимальную эффективность

$K(u) = \max_{y \in P(u)} F(u, y)$ (или максимальную гарантированную эффективность

$K_g(u) = \min_{y \in P(u)} F(u, y)$).

Отметим, что приведенная теоретико-игровая задача управления АС, в которой центр является метаигроком, обладающим правилом первого хода и имеющим возможность назначать свою стратегию, которая зависит от стратегий АЭ ($u = \tilde{y}(y)$), является *игрой типа Γ_2* в терминологии теории иерархических игр [1]. Зависимость $\tilde{y}(x)$ называется механизмом управления в узком смысле (см. определение выше). Два важных частных случая общей постановки составляют задачи стимулирования и задачи планирования.

В *задаче стимулирования* (стимулированием в организационных системах называется комплексное целенаправленное внешнее воздействие на компоненты деятельности (и процессы их формирования) управляемых субъектов [5]) стратегией центра состоит в выборе системы (механизма) стимулирования (набора функций стимулирования) $s(y) = \{s_i(y)\}$, ставящей в соответствие действиям АЭ размеры вознаграждений, получаемых от центра, т.е. $u = s(y)$. Задачей синтеза оптимальной функции стимулирования называется задача поиска допустимой системы стимулирования, имеющей максимальную эффективность. При их изучении основной акцент делается на исследовании влияния параметров АС и ограничений механизма стимулирования на множество решений игры. Теоретические результаты исследования задачи стимулирования приведены в работах [5, 6, 8, 16], ряд прикладных результатов описан ниже в третьем разделе настоящей работы.

В *задаче планирования* стратегия центра состоит в выборе множества возможных сообщений АЭ и механизма (процедуры) планирования, ставящего в соответствие сообщениям элементов центру о неизвестных ему существенных параметрах назначаемый АЭ вектор планов. При их изучении основной акцент, помимо анализа эффективности, делается на исследовании выгоды для АЭ сообщения центру достоверной информации - так называемая *проблема манипулируемости*. Теоретические результаты исследования задачи планирования приведены в работах [6, 8, 10, 12, 18], ряд прикладных результатов описан в следующем разделе настоящей работы.

2. Базовые механизмы управления активными системами

Подробно исследованные в ТАС практически значимые детализации общих задач планирования и стимулирования получили условное название *базовых механизмов управления*. Они являются элементами «конструктора», используя которые можно синтезировать механизмы управления теми или иными классами реальных АС.

2.1. Механизмы комплексного оценивания. Для выработки эффективных управляющих воздействий, начиная с этапа целеполагания и заканчивая этапом оперативного управления, центру необходимо обладать достаточной информацией о поведении управляемых субъектов, в частности - относительно результатов их деятельности. В сложных (многоэлементных, многоуровневых АС, деятельность которых описывается многими критериями) системах в силу ограниченности возможностей центра по переработке информации или в силу отсутствия детальной информации целесообразно использование *механизмов комплексного оценивания*, которые позволяют осуществлять свертку показателей, т.е. агрегировать информацию о результатах деятельности отдельных АЭ.

При исследовании механизмов комплексного оценивания решается задача синтеза процедур агрегирования информации, которые адекватно отражали бы содержательные аспекты взаимодействия участников АС и позволяли бы центру принимать решения на основании агрегированной информации. Это направление тесно связано с проблематикой многокритериальной оптимизации и теорией информационных управляющих систем. В ТАС были разработан ряд механизмов автоматизированной комплексной оценки результатов деятельности [7, 10, 17], использующих различные процедуры агрегирования (широкое распространение получили процедуры матричных сверток [13] и др.).

2.2. Механизмы активной экспертизы. Исследованию формальных моделей получения и обработки экспертной информации в ТАС посвящено значительное число работ [10, 13, 17]. Под *механизмом активной экспертизы* (частный случай задачи планирования) в двухуровневой АС понимается следующая модель. Имеются n АЭ - экспертов, каждый из которых имеет собственные представления $r_i \hat{I} [d; D] \hat{I} \mathcal{R}^1$ (идеальные точки, точки пика функций предпочтения АЭ) об оцениваемой скалярной величине и сообщает центру информацию $s_i \hat{I} [d; D]$ о своих представлениях. Итоговое мнение $x \hat{I} [d; D]$ определяется в соответствии с процедурой планирования $\pi(s)$, то есть $x = \pi(s)$. Относительно процедуры планирования предполагают, что она непрерывна, строго монотонно возрастает по всем переменным и удовлетворяет *условию единогласия*: " $t \hat{I} [d; D] \pi(t, t, \dots, t) = t$ ". Без потери общности можно положить $d = 0, D = 1$. Если предположить, что каждый из экспертов заинтересован в том, чтобы результат экспертизы - коллективное решение - был максимально близок к его истинному мнению, то в общем случае он может сообщать недостоверную информацию, искренне стремясь повлиять на результат в требуемую с его точки зрения сторону. Следовательно, возникает проблема манипулируемости механизма экспертизы.

В работах [10, 13, 16] показано, что для любого механизма экспертизы, удовлетворяющего введенным выше предположениям, существует эквивалентный прямой (неманипулируемый) механизм, причем итоговое мнение в равновесии определяется совокупностью истинных мнений экспертов $\{r_i\}$, сообщение которых

является доминантной стратегией, и числами $w(\pi) = \{w_i(\pi)\}_{i=0}^n$, которые вычисляются следующим образом: если собственные представления всех экспертов различны и упорядочены в порядке возрастания, то $w_k(p) = \pi \left(\underset{k}{00}, \underset{m-k}{11} \right)$, $k = \overline{0, n}$. При этом равновесное итоговое мнение (коллективное решение) x^* ищется следующим образом:

$$x^*(r, w(\pi)) = \max_{k=1, n} \min (w_{k-1}, r_k).$$

Подкласс механизмов экспертизы составляют *механизмы согласия* (которые также могут рассматриваться как разновидность механизмов распределения ресурса - см. ниже) [13]. Основная идея заключается в том, чтобы эксперты сообщали не просто оценки некоторых величин, а соотносили важность оцениваемого показателя с некоторым общим для всех - так называемым "базовым" - показателем.

Возможность обеспечения достоверности сообщаемой экспертами информации дает также применение *многоканальных механизмов экспертизы*. При нескольких параллельных каналах выработки управляющих воздействий многоканальная структура системы в ряде случаев позволяет снизить имеющуюся неопределенность. В частности, при использовании модели управляемой системы, центр имеет возможность оценить какова была бы эффективность управления при реальном использовании предложений каждого из экспертов. Система стимулирования экспертов, зависящая от этой оценки и реальной эффективности управления, позволяет добиться неманипулируемости механизма. Та же идея используется и в *автономных механизмах экспертизы*, в которых эксперты самостоятельно (не сообщая каждый центру своих мнений) приходят к согласию относительно коллективного решения и сообщают его центру. Стимулирование, пропорциональное эффективности этого коллективного решения, также дает возможность обеспечить неманипулируемость автономных механизмов экспертизы [11, 13].

2.3. Механизмы формирования состава и структуры активной системы. Одной из задач управления АС является синтез механизмов управления в широком смысле (см. классификацию выше), включающих в себя механизмы формирования состава АС - в том числе, например, конкурсные механизмы формирования состава АС (тендеры), и структуры АС - в том числе, например, многоканальные механизмы [10]. Кроме того, вопросы синтеза структуры АС изучаются при исследовании многоуровневых АС (см. работу [14]), а также при исследовании механизмов управления риском (основывающихся на идее функциональной избыточности состава участников АС [13, 16]) на этапе формирования состава АС.

Наблюдаемая в настоящее время распространенность, если не сказать "мода", всевозможных конкурсов, а также приводимые для обоснования их целесообразности качественные рассуждения наталкивают на мысль - быть может, честное соревнование действительно является панацеей от многих, если не всех, бед. На самом деле, формальный анализ конкурсных механизмов (которые в случае неделимых объектов конкурса называются *тендерами*, или *дискретными конкурсами*) показывает, что не все так просто.

Более корректно тендером (дискретным конкурсом) называется конкурс, в котором победители получают в точности заявленную величину (ресурс, финансирование, выгодный проект и т.д.), а проигравшие не получают ничего. Пусть эффективность участника определяется как отношение оценки социально-экономического эффекта (точно известной и объективно заданной извне) и сообщенной участником - активным элементом - оценки (требуемого ресурса, затрат и т.д.).

Основная идея *простых конкурсов* заключается в упорядочении АЭ в порядке убывания эффективностей и выделения им ресурса в требуемом объеме последовательно, пока не закончится весь ресурс. К сожалению, гарантированная эффективность простых конкурсных механизмов равна нулю (точнее, может быть сколь угодно мала) [13, 16].

Несколько лучше обстоит дело в *прямых конкурсных механизмах*, в которых центр решает задачу о ранце, используя сообщенные АЭ оценки - гарантированная эффективность прямых конкурсов равна 0,5. Несколько более высокой эффективностью обладают *двухэтапные конкурсы* [13]. Вопрос о максимальной гарантированной эффективности конкурсных механизмов на сегодня остается открытым.

2.4. Механизмы распределения ресурса [10, 13] составляют обширный и чрезвычайно важный с точки зрения практических приложений класс механизмов планирования. При их изучении решаются два основных вопроса - синтеза механизма максимальной эффективности и исследования манипулируемости механизмов планирования, т.е. возможности построения для них эквивалентных прямых механизмов. Механизмы распределения ресурса включают в себя приоритетные, конкурсные и другие механизмы, кратко рассматриваемые ниже.

2.4.1. Неманипулируемые механизмы распределения ресурса. Приведем постановку *задачи распределения ресурса* в двухуровневой АС [10] (механизмы распределения ресурса в многоуровневых АС рассматривались в работах [13, 14]). Пусть в распоряжении центра имеется ресурс в количестве R . Задача распределения ресурса подразумевает нахождение такого его распределения между АЭ, которое максимизировало бы некоторый критерий эффективности - например, суммарную эффективность использования ресурса активными элементами. Если эффективность использования ресурса конкретным АЭ не известна центру, то он вынужден использовать сообщения АЭ, например, о требуемых количествах ресурса. Понятно, что, если имеется дефицит ресурса, то возникает проблема манипулируемости - АЭ могут сообщать центру недостоверную информацию, стремясь получить оптимальное для себя количество ресурса. Перейдем к описанию формальной модели.

Пусть АЭ сообщают центру информацию $s_i \in \Omega_i = [0; D_i] \in \mathbb{R}^1$ - заявки на ресурс, $i \in I$. Центр на основании сообщенной ему информации назначает АЭ планы (выделяет ресурс) $x_i = \pi_i(s, R)$, где π_i - *процедура распределения ресурса* (планирования). Точки пика $r_i \in \mathbb{R}^1$ соответствуют оптимальному для них количеству ресурса. Предположим,

что выполнена гипотеза дефицитности: $\sum_{i=1}^n r_i > R$, а относительно процедуры

распределения ресурса будем считать, что $\pi_i(s, R)$ - непрерывны, строго монотонно возрастают по s_i и R и строго монотонно убывают по $s_j, j \neq i$; весь ресурс

распределяется полностью: $\sum_i x_i = R$; ресурс делим в произвольных пропорциях,

причем любой АЭ может отказаться от ресурса вообще. Классическим примером механизма распределения ресурса является *механизм пропорционального*

распределения:
$$x_i = \frac{s_i}{\sum_{j=1}^n s_j} R.$$

В работе [10] доказано, что для любого механизма из рассматриваемого класса механизмов распределения ресурса существует эквивалентный прямой механизм, т.е.

неманипулируемый механизм, в котором все АЭ сообщают оценки точек пика и получают в равновесии то же количество ресурса, что и в исходном механизме. В этой же работе приведен конструктивный алгоритм построения соответствующего прямого механизма. "Двойственной" к задаче распределения ресурса (дохода) является задача распределения затрат [13, 17].

2.4.2. Конкурсные механизмы распределения ресурса относятся к особому типу приоритетных механизмов, в которых на основе приоритетов определяется множество победителей. Победители конкурса либо получают право на получение ресурса, либо получают выгодный заказ и т.д.

Распределение ресурсов на конкурсной основе означает, что ресурс в первую очередь получают потребители - участники конкурса, у которых эффективность использования ресурса максимальна, причем под эффективностью понимается эффект на единицу ресурса. Центр упорядочивает АЭ в порядке убывания эффективностей и распределяет ресурс в размере, заявленном АЭ, пока не закончится весь ресурс - так называемые *непрерывные конкурсы* (см. также выше описание дискретных конкурсов).

Если эффективности использования ресурса элементами неизвестны центру и сообщаются последними, то возникает проблема манипулируемости. Для конкурсных механизмов со штрафами за несоответствие реальной и заявленной эффективностей исследованы свойства равновесных сообщений АЭ (в частности, показано, что в ситуации равновесия эффективности всех победителей конкурса равны одному и тому же числу). Также доказано, что конкурсный механизм обеспечивает оптимальное (с точки зрения суммарной эффективности) распределение ресурса. Более того, если выполнена гипотеза слабого влияния (ГСВ), то для любого конкурсного механизма существует эквивалентный (не меньшей эффективности) механизм открытого управления, в котором сообщение достоверной информации является доминантной стратегией АЭ [10, 17].

2.5. Механизмы финансирования, с одной стороны, могут рассматриваться как подкласс механизмов распределения ресурсов (финансовых). С другой стороны, в силу их многообразия и специфичности, зачастую их выделяют в самостоятельный класс механизмов управления АС, включающий в себя механизмы: смешанного финансирования и кредитования, самоокупаемости, страхования, противозатратные механизмы и др.

Идея *смешанного финансирования* заключается в том, что средства одной из организаций на некоторый проект выделяются только при условии, что и другая организация (партнер) обязуется выделить на этот проект собственное финансирование. Жесткая фиксация долей вкладываемых средств имеет свои минусы - желающих вложить собственные средства будет либо слишком много, либо может не быть вообще. Следовательно, возникает задача синтеза механизма с гибко настраиваемыми размерами долей финансирования. Так как эти доли должны зависеть от неизвестных центру величин, например - параметров функций предпочтения кредиторов, то возникает задача манипулируемости. В работе [13] приведены условия, при которых механизм смешанного финансирования обеспечивает большее привлечение средств, чем прямое финансирование проекта, причем использование этого механизма выгодно как для центра, так и для АЭ - организаций-кредиторов.

Если некоторый проект состоит из совокупности работ (подпроектов), причем для начала выполнения каждого подпроекта требуются некоторые затраты, а его окончание приносит некоторую (быть может, отрицательную) прибыль, то возникает задача построения *механизма самоокупаемости* (самофинансирования), то есть задача

определения оптимальной последовательности выполнения работ. В работе [13] предложена последовательность выполнения работ, минимизирующая привлеченные средства. Если параметры работ (например, затраты) неизвестны центру, то он может воспользоваться оценками, сообщаемыми АЭ, при этом построен неманипулируемый механизм (механизм открытого управления) и показано, что оптимальная последовательность работ в исходном и эквивалентном прямом механизме одинаковы [13].

Важный класс механизмов финансирования составляют *механизмы страхования*, основанные на взаимовыгодном перераспределении риска между нейтральным к риску страховщиком - центром и несклонным к риску страхователем - АЭ [13]. Если имеет место асимметричная информированность (например, центр может не знать точного размера ущерба от наступления страхового случая или иметь неточную оценку вероятности наступления этого события и т.д.), то, опять же, возникает проблема манипулирования со стороны АЭ.

Если конкурсные механизмы рассчитаны на применение в ситуациях, когда имеется несколько управляемых субъектов примерно "равной силы", то *противозатратные механизмы* позволяют эффективно управлять монополистами. Противозатратными называются такие механизмы управления, которые побуждают каждый АЭ максимально повышать эффективность своей деятельности, выполнять соответствующую работу с высоким качеством и минимальными затратами.

В основе работы противозатратных механизмов лежит следующая общая идея. Предположим, что целевая функция АЭ зависит от переменных двух типов - параметров, выбираемых самим АЭ (например, затраты труда, объем выпуска и т.д.), и параметров, устанавливаемых центром - управлением (например, нормативы рентабельности, коэффициенты ценообразования, налоговые показатели и т.д.). Задача центра заключается в выборе таких значений управлений, чтобы целевая функция АЭ вела себя требуемым образом (например, возрастала или убывала по соответствующим параметрам, выбираемым АЭ) [10]. Примерами могут служить: противозатратные механизмы ценообразования и противозатратные механизмы налогообложения [10, 17].

2.6. Механизмы внутрифирменного управления составляют обширный класс прикладных механизмов, широко применяемых в процессах реструктуризации и реформирования предприятий (в консалтинге), повышения эффективности функционирования промышленных, научных и других организаций [11, 19]. Наиболее ярким и характерным представителем этого класса является *механизм внутренних цен* (частный случай механизма планирования), рассматриваемый ниже.

Классическим примером АС, в которой "работает" механизм открытого управления [8], ставшей, в частности поэтому, чрезвычайно популярной в экономико-математическом моделировании, служит АС, в которой АЭ имеют функции затрат типа Кобба-Дугласа. Пусть в двухуровневой АС функция затрат i -го АЭ (например, подразделения некоторого объединения, фирмы и т.д.): $c_i(y_i, r_i) = \frac{1}{a} y_i^a r_i^{1-a}$, где $y_i \in \mathbb{R}^1$ - действие АЭ, $a \geq 1$, $r_i > 0$.

Предположим, что задача центра - руководства объединения - заключается в побуждении коллектива АЭ выбрать набор действий, сумма которых равна заданной величине R (типичная задача стимулирования в АС со слабо связанными АЭ - см. выше). Предположим, что центр устанавливает цену $\lambda \geq 0$, тогда целевая функция i -го АЭ равна разности между доходом λy_i и затратами: $f_i(y_i, r_i) = \lambda y_i - c_i(y_i, r_i)$.

Решение задачи минимизации суммарных затрат АЭ выбором $(\{x_i\}, \lambda)$ при условии $x_i = \text{Arg} \max_{y_i \in A_i} f_i(y_i, r_i)$ и следующем ограничении: $\sum_{i=1}^n x_i = R$, имеет вид:

$$x_i^*(R, r) = \frac{r_i}{W} R, \lambda^*(R, r) = (R/W)^{a-1}, \text{ где } W = \sum_{i=1}^n r_i.$$

Рассматриваемая формальная модель имеет множество содержательных интерпретаций. В том числе: распределение объемов работ в коллективе (λ - ставка оплаты), распределение ресурса с ценой за ресурс λ , распределение заказов в объединении (λ - внутрифирменная цена) и др.

Если коэффициенты $\{r_i\}$ неизвестны центру и сообщаются элементами, то возникает задача манипулируемости механизма планирования. Уникальность рассматриваемой модели состоит в том, что для нее существует эквивалентный прямой механизм, то есть механизм открытого управления (неманипулируемый), в котором при справедливости ГСВ (которая в данном случае заключается в том, что влияние каждого АЭ на общее управление - цену $\lambda(R, s)$) сообщение достоверной информации является доминантной стратегией каждого активного элемента. При этом механизм внутренних цен, т.е. - управляющие параметры $\{x_i^*\}, \lambda^*$, определяется из решения

$$\text{задачи: } \sum_{i=1}^n x_i(s, \lambda) = R, x_i(s, \lambda) = \arg \max_{y_i \in A_i} \{\lambda(s) y_i - c_i(y_i, s_i)\}, \text{ имеющего вид: } x_i^*(R, s) = \frac{s_i}{V} R,$$

$$\lambda^*(R, s) = (R/V)^{a-1}, \text{ где } V = \sum_{i=1}^n s_i, s - \text{вектор сообщений АЭ.}$$

Если выполнена ГСВ, то при любых сообщениях остальных АЭ максимум целевой функции i -го АЭ по его сообщению достигается при $s_i = r_i$, т.е. сообщение достоверной информации является доминантной стратегией каждого АЭ. Отметим, что в ряде частных случаев выполнения ГСВ не требуется. Так, например, в механизмах внутрифирменного управления, если в целевой функции подразделения его прибыль нормируется на сумму прибылей всех подразделений, то цена, входящая и в числитель, и в знаменатель, сокращается [13, 14].

3.7. Механизмы стимулирования. В прикладных моделях ключевую роль играет не столько теоретико-игровой анализ задач стимулирования, сколько содержательно интерпретируемые свойства тех или иных классов систем стимулирования. Перечислим основные классы базовых систем стимулирования.

Скачкообразные системы стимулирования (С-типа) характеризуются тем, что АЭ получает постоянное вознаграждение (как правило, равное максимально возможному значению) при условии, что выбранное им действие не меньше заданного, и нулевое вознаграждение при выборе меньших действий. Этот класс систем стимулирования достаточно подробно исследован. В частности, для большинства моделей АС доказана их оптимальность в задачах первого рода [5, 12]).

Системы стимулирования С-типа содержательно могут интерпретироваться как *аккордные*, соответствующие фиксированному вознаграждению при объеме работ не ниже оговоренного заранее. Другая содержательная интерпретация соответствует, например, фиксированному окладу без каких либо надбавок и оценки качества деятельности.

Компенсаторные системы стимулирования (К-типа) характеризуются тем, что активному элементу компенсируют затраты при условии, что его действия лежат в определенном диапазоне, задаваемым, например, ограничениями C на абсолютное значение индивидуального вознаграждения:

$$\sigma_K(x,y) = \begin{cases} c(y), c(y) \leq C \\ 0, c(y) > C \end{cases} .$$

Компенсаторные системы стимулирования оказываются оптимальными во многих моделях АС [5].

Пропорциональные системы стимулирования (L-типа). На практике широко распространены системы оплаты труда, основанные на введении ставок оплаты: повременная оплата подразумевает существование ставки оплаты единицы рабочего времени (как правило, часа или дня), сдельная оплата - существование ставки оплаты за единицу продукции и т.д. Вознаграждение АЭ прямо пропорционально его действию (количеству отработанных часов, объему выпущенной продукции и т.д.), а ставка оплаты $\alpha \geq 0$ является коэффициентом пропорциональности: $\sigma_L(y) = \alpha y$. Как правило, эти системы стимулирования не оптимальны - их эффективность ниже, чем систем С-типа и К-типа. Количественные оценки сравнительной эффективности приведены в работе [14].

Системы стимулирования, основанные на перераспределении дохода (D-типа) используют следующую идею. Так как центр выражает интересы системы в целом, то можно условно идентифицировать его доход и доход от деятельности всей АС. Поэтому возможно основывать стимулирование АЭ на размере дохода центра - когда вознаграждение АЭ составляет определенную (постоянную) часть дохода центра. Эффективность этого класса систем стимулирования не высока - см. оценки сравнительной эффективности в работе [14].

Перечисленные системы стимулирования являются простейшими - базовыми, представляя собой элементы "конструктора", используя которые можно построить другие более сложные системы стимулирования [19].

2.8. Механизмы обмена. В современных экономических условиях для предотвращения остановки производства предприятия применяют различные хозяйственные стратегии: в рамках договоров о совместной деятельности создаются различные давальческие схемы, широко распространена система многоступенчатого бартера и др. Давальческие схемы характерны и особенно эффективны для технологически взаимосвязанных предприятий, составляющих так называемые производственные цепочки [13, 19].

3. Опыт практического использования прикладных моделей

Полученные в ТАС результаты нашли свое применение при создании прикладных моделей (см. предыдущий раздел), которые, в свою очередь, применялись на практике для синтеза или модификации механизмов управления реальными социально-экономическими системами. Отметим, что многие классы одних и тех же прикладных механизмов с соответствующими модификациями использовались при решении самых разных прикладных задач. Перечислим основные работы, содержащие описание методик внедрения и опыта практического использования прикладных моделей (подробная библиография содержится в работе [19]).

Обширной областью применения результатов ТАС стали механизмы управления проектами, используемые на протяжении всего жизненного цикла проекта [13].

Другой областью являются организационные и экономические механизмы управления безопасностью сложных систем, в том числе - создаваемые в рамках Федеральной Программы "Безопасность". Богатый опыт был накоплен в ТАС по

реализации механизмов управления развитием приоритетных направлений науки и техники, в том числе, разрабатываемых совместно с Миннауки РФ.

Интересную, как с содержательной, так и с методической точки зрения, область представляют механизмы управления качеством подготовки специалистов [17], которые, с одной стороны, ориентированы на эффективное управление образовательными системами, а с другой стороны, использовались совместно с имитационными играми в качестве содержания и форм учебного процесса.

Многоканальные механизмы управления [10] внедрялись на предприятиях черной металлургии, в здравоохранении и в процессах обучения. Противозатратные и конкурсные механизмы использовались в Институте проблем управления и на некоторых предприятиях и в научных институтах Минрадиопрома [10, 13]. Системы планирования и управления промышленным производством и процедуры комплексной оценки применялись в научных организациях и в системе Минрадиопрома [7, 10, 15, 19].

Заключение

Перечислим перспективные направления будущих исследований. Введенная выше система классификаций задач управления АС позволила достаточно полно охарактеризовать рассматриваемую предметную область и дала возможность выполнить краткий обзор известных подходов. Кроме того, она выявила "белые пятна", которые и являются потенциальными предметами будущих исследований.

Стоящие сегодня перед ТАС задачи можно условно разделить на организационные и научные. Организационные задачи - популяризация ТАС, подготовка специалистов, установление более тесных содержательных и информационных связей с близкими разделами теории управления социально-экономическими системами и др. Более важны научные задачи - исследование новых классов механизмов управления АС, среди которых выделим *общие теоретические задачи* (систематическое перечисление частных теоретических задач выходит за рамки настоящей работы, да и, наверное, нецелесообразно, в силу многообразия подходов и индивидуальных мнений ученых) и *прикладные задачи* - разработки конкретных, ориентированных на практику, механизмов управления.

Общие теоретические задачи:

- адекватный учет и дальнейшее развитие в формальных моделях современных представлений психологии, экономики и социологии;

- анализ и синтез механизмов управления в условиях возможности образования коалиций участниками АС;

- исследование механизмов управления АС, функционирующими в условиях неопределенности;

- разработка моделей и методов синтеза состава и структуры АС, в том числе, многоуровневых и сетевых структур управления;

- изучение условий неманипулируемости механизмов планирования общего вида;

- теоретическое исследование устойчивости решений задач управления активными системами и адекватности моделей АС реальным организационным системам.

Важнейшей прикладной задачей ТАС, пожалуй, является унификация описания частных механизмов управления, создание информационной базы, содержащей как прикладные (ориентированные на использование неспециалистом по исследованию

операций) компьютерные программы, реализующие эти механизмы, так и систематизированное описание имеющихся результатов их практического применения.

Литература

1. *Гермейер Ю.Б.* Игры с противоположными интересами. - М.: Наука, 1976.
2. *Кононенко А.Ф., Халезов А.Д., Чумаков В.В.* Принятие решений в условиях неопределенности. - М.: ВЦ АН СССР, 1991.
3. *Бурков В.Н., Еналеев А.К., Новиков Д.А.* Механизмы стимулирования в вероятностных моделях социально-экономических систем (обзор) // Автоматика и телемеханика. - 1993. - № 11. - С. 3 – 30.
4. *Новиков Д.А.* Механизмы стимулирования в динамических и многоэлементных социально-экономических системах (обзор) // Автоматика и телемеханика. - 1997. - № 6. - С. 3 - 26.
5. *Новиков Д.А.* Стимулирование в социально-экономических системах (базовые математические модели). - М.: ИПУ РАН, 1998.
6. *Бурков В.Н., Еналеев А.К., Новиков Д.А.* Механизмы функционирования социально – экономических систем с сообщением информации (обзор) // Автоматика и телемеханика. - 1996. - № 3. - С. 3 - 26.
7. *Ашимов А.А., Бурков В.Н., Джапаров Б.А., Кондратьев В.В.* Согласованное управление активными производственными системами. - М.: Наука, 1986.
8. *Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. - М.: Наука, 1977.
9. *Бурков В.Н.* Человек. Математика. Управление. - М.: Просвещение, 1989.
10. *Бурков В.Н., Данев Б., Еналеев А.К., Кондратьев В.В., Нанева Т.Б., Щепкин А.В.* Большие системы: моделирование организационных механизмов. - М. Наука, 1989.
11. *Бурков В.Н., Ириков В.А.* Модели и методы управления организационными системами. - М.: Наука, 1994.
12. *Бурков В.Н., Кондратьев В.В.* Механизмы функционирования организационных систем. - М.: Наука, 1981.
13. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Как управлять проектами. М.: Синтег, 1997.
14. *Новиков Д.А.* Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем. - М.: Фонд " Проблемы управления", 1999.
15. *Цыганов В.В.* Адаптивные механизмы в отраслевом управлении. - М.: Наука, 1991.
16. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Введение в теорию активных систем: Учебное пособие. - М.: ИПУ РАН, 1996.
17. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Модели и механизмы теории активных систем в управлении качеством подготовки специалистов. - М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов МО и ПО РФ, 1998.
18. *Новиков Д.А., Петраков С.Н.* Курс теории активных систем. - М.: СИНТЕГ, 1999.
19. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: СИНТЕГ, 1999.

Владимир Николаевич Бурков – д-р технических наук, профессор, зав. лабораторией Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Дмитрий Александрович Новиков – д-р технических наук, ведущий научный сотрудник того же института.

Е (095)334-79-00, факс (095)334-89-11, e-mail: vlab@ipu.rssi.ru, nov@ipu.rssi.ru.