

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова

Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили

АКТИВНЫЙ ПРОГНОЗ

Москва – 2002

УДК 007
ББК 32.81
Н 73

Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Активный прогноз. М.: ИПУ РАН, 2002. – 101 с.

Настоящая работа содержит результаты исследований теоретико-игровых моделей активного прогноза, который рассматривается как разновидность информационного управления в организационных системах. Наряду с этим описываются результаты изучения таких видов информационного управления как информационное регулирование и рефлексивное управление.

Работа рассчитана на специалистов (теоретиков и практиков) по управлению организационными системами.

Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Кульба

Утверждено к печати Редакционным советом Института

Текст воспроизводится в виде, утвержденном Редакционным советом Института

ã Институт проблем управления РАН, 2002

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Активный и пассивный прогноз	6
2. Модель принятия решений	14
3. Управление и его типы	21
4. Влияние сообщений центра на выбор агента	30
4.1. Принцип доверия	30
4.2. Рефлексивное управление	31
5. Информационное равновесие	39
6. Задача активного прогнозирования	45
7. Точность и эффективность активного прогноза	49
8. Проблема стабильности информационного управления	53
9. Примеры моделей информационного управления	58
9.1. Пример 1 (Производитель и посредник)	59
9.2. Пример 2 (Совместное производство)	63
9.3. Пример 3 (Конкуренция на рынке)	71
9.4. Пример 4 (Распределение ресурса)	75
9.5. Пример 5 (Аукцион)	78
9.6. Пример 6 (Аккордная оплата труда)	81
Заключение	90
Литература	94

ВВЕДЕНИЕ

Люди всегда стремились и стремятся к уменьшению влияния неконтролируемых ими факторов на результаты деятельности за счет получения дополнительной информации о том, что им неизвестно вообще или известно неточно. Этим, наверное, качественно объясняется широкая распространенность в нашей жизни всевозможных прогнозов – погоды, состояния рынка, экономического развития, научно-технического прогресса и т.д.

Информация, получаемая субъектом (в том числе – коллективным) в результате прогноза, может быть просто принята им к сведению, а может изменить его поведение по сравнению с тем как он вел бы себя в отсутствии этой информации. В первом случае говорят о пассивном прогнозе, во втором случае – об активном. Такое разделение условно, так как в принципе любой прогноз может рассматриваться как активный, поэтому активным обычно считается прогноз, в результате которого целенаправленное изменение поведения субъекта проявляется достаточно ярко.

Исследованию проблем прогнозирования в различных областях человеческой деятельности посвящено колоссальное число работ. Большинство из них описывает технологию (методы) прогнозирования. Вопросы же влияния прогноза на поведение той или иной системы, если и обсуждаются, то, в основном, на качественном уровне. Поэтому в настоящей работе предпринимается попытка систематического рассмотрения формальных (теоретико-игровых) моделей активного прогнозирования.

Для этого в первом разделе проводится краткий обзор существующих подходов к определению активного прогноза.

Во втором разделе вводится *модель принятия решений*, охватывающая известные формальные задачи управления организационными системами.

В рамках этой модели в третьем разделе определяется понятие *управления* (как воздействия на управляемую систему с целью обеспечения требуемого ее поведения), и выделяются следующие его типы: *институциональное управление* (изменение множеств допустимых действий участников системы), *мотивационное управление* (изменение функций полезности), *информационное управление* (изменение информации, которую управляемые субъекты

екты – агенты – используют при принятии решений о выбираемых действиях). В информационном управлении предлагается различать следующие его виды: *информационное регулирование* – целенаправленное влияние управляющего органа (*центра*) на информацию о внешних неопределенных факторах (*состоянии природы*), *рефлексивное управление* – целенаправленное влияние на информацию о моделях принятия решений участниками системы, *активный прогноз* – целенаправленное сообщение информации о будущих значениях параметров, зависящих от состояния природы и действий субъектов. В рамках этого подхода **активный прогноз рассматривается как средство управления**¹.

В четвертом разделе вводятся: *принцип доверия*, в соответствии с которым изменением множества допустимых стратегий центра задача информационного управления может без потери общности решаться в предположении, что агент полностью доверяет центру и использует при принятии решений в точности ту информацию, которую ему сообщил центр; *принцип достаточной рефлексии*, в соответствии с которым глубина рефлексии агента определяется его информированностью.

В пятом разделе определяется *информационное равновесие* как совокупность равновесных при заданной информированности стратегий агентов и формулируется в общем виде *задача информационного управления*, заключающаяся в нахождении таких сообщений центра агентам, которые побуждали бы их выбирать наиболее эффективные (с точки зрения заданного критерия эффективности) действия.

В шестом разделе конкретизируется *задача активного прогнозирования* как задача такого целенаправленного сообщения центром информации о будущих значениях параметров, зависящих от состояния природы и действий агентов, которое приводило бы систему в наиболее эффективное с точки зрения центра состояние.

В седьмом разделе *точность активного прогноза* определяется как разность между спрогнозированным центром и фактически реализовавшимся состояниями системы, а *эффективность актив-*

¹ Частный случай, когда информационное воздействие не является целенаправленным, полностью охватывается предлагаемым ниже подходом к описанию активного прогноза.

ного прогноза – как значение критерия эффективности состояния системы (оцениваемого управляющим органом), в котором она оказалась под влиянием этого прогноза.

Восьмой раздел посвящен формализации и исследованию таких свойств информационного управления как его стабильность и согласованность. Предлагается называть информационное управление *стабильным*, если в его результате агент получает тот выигрыш, на который он рассчитывал, и *согласованным*, если выигрыш агента в присутствии информационного управления не меньше, чем выигрыш в его отсутствии.

Девятый раздел содержит *решения задач информационного управления* для ряда частных моделей, в том числе – примеры формальных моделей активного прогноза.

Обсуждение основных результатов и перспективных направлений дальнейших исследований приводится в заключении.

1. АКТИВНЫЙ И ПАССИВНЫЙ ПРОГНОЗ

Рассмотрим основные известные подходы к определению пассивного и активного прогнозов. Следует сразу отметить, что мы не будем обсуждать технологию и методы прогнозирования, подробно описанные в [19, 20, 51, 54, 86, 92, 95, 96, 97, 111] и других работах.

В энциклопедическом словаре приводится следующее определение [90, С. 1063]: «*Прогноз* (от греческого *prognosis* – предвидение, предсказание) – конкретное предсказание, суждение о состоянии какого-либо явления в будущем». В [87] прогноз определяется как «некоторое суждение относительно неизвестных, особенно – будущих событий. Термины «суждение» и «событие» получают здесь свободное толкование. Совершенно необязательно, чтобы это «суждение» появилось в письменной форме, было опубликовано или сообщено каким-либо иным способом. Описываемое событие может выражать даже отсутствие некоторых явлений».

В [6] выделяется позитивный конструктивный подход к прогнозированию как активному воздействию на будущее путем планирования, программирования, проектирования и управления явлениями и процессами. В рамках этого подхода прогнозирование

не является самоцелью, а составляет основу для принятия решений [116]. В прогнозе в качестве параметров должны фигурировать управляющие переменные (то есть должны анализироваться различные сценарии), и для характеристики места прогноза в принятии решений² можно выделить следующую цепочку «прогноз-план-программа-проект-управление» [6, С.21].

Взаимоотношение между прогнозом и принятием решений рассматривается также в [97]: 1) знание лицом, принимающим решение (ЛПР), настоящего состояния описывается в некоторых переменных. Далее, 2) выделяются инструментальные (управляемые) и неуправляемые переменные. 3) Осуществляется предсказание будущих значений неуправляемых переменных в зависимости от значений управляемых переменных – получаются условные прогнозы (сценарии). 4) Оцениваются результаты, то есть сравниваются исходы третьего пункта. 5) Производится выбор значений управляемых переменных, то есть осуществляется принятие решений. Другими словами, формулирование решения в зависимости от текущего состояния отражает политику ЛПР (то есть, механизм принятия решений). Таким образом, в рассматриваемом случае имеет место игра одного активного игрока с пассивным игроком, называемым в исследовании операций "*природой*". Влияние его прогноза на поведение других субъектов не учитывается (точнее учитывается пассивно – через прогноз неуправляемых переменных), то есть прогноз в этом случае является не методом управления, а методом устранения неопределенности (условного по стратегии).

В [80, 81] выделяются поисковый и нормативный прогнозы. Под *поисковым прогнозом* понимается определение возможных состояний объекта прогнозирования в будущем. Задача *нормативного прогноза* заключается в определении путей и сроков достижения желаемых состояний прогнозируемого объекта в будущем. Другими словами нормативный прогноз – предсказания, «цель которых заключается в том, чтобы вызвать интерес и побудить к

² Вообще, прогнозирование является неотъемлемым этапом управления. В настоящей работе акцент делается, в основном, на тех случаях, когда собственно управление заключается в целенаправленном сообщении прогнозной или какой-либо другой информации.

действию» [111, С. 58]. Поэтому нормативный прогноз может рассматриваться как управление в явном виде.

В [54] подчеркивается, что специалист, принимающий решения на основании прогноза, пытается предотвратить неблагоприятный прогноз и увеличить вероятность благоприятного прогноза. Существуют две «крайности» во влиянии прогноза на управление [54, С.21]: «*Самоосуществляющийся прогноз* – это такой прогноз, который оказывается достоверным только потому, что был сделан. *Самоаннулирующийся прогноз* – такой прогноз, который, наоборот, становится недостоверным только потому, что был сделан». Аналогичные свойства политических прогнозов обсуждаются в [89].

В [19] выделяется *активный и пассивный прогноз*, и обсуждаются проблемы априорной и апостериорной оценки качества прогноза. «Пассивный прогноз – такой, для которого результат прогноза не влияет и, по сути, не может влиять на объект прогнозирования. Если же воздействием прогноза на объект прогнозирования нельзя пренебречь (такой прогноз называется активным), то логика прогнозирования резко меняется и усложняется, так как сам прогноз должен учесть эффект результатов прогнозирования». Следовательно, активным является любой нормативный прогноз, а также такие поисковые прогнозы, которые используются при принятии управленческих решений. Для активного прогноза совпадение прогнозных показателей с реальными не является доказательством высокого качества прогноза [19, С.19]. Влияние прогноза на предсказываемое событие в [77] было предложено называть Эдиповым эффектом, однако, этот термин не прижился.

Приведем пример активного прогноза. В [52, С.147] описывается следующий эффект. «Вечером 6 января 1981 года Джозеф Гранвилл, известный советник по капиталовложениям во Флориде, отправил своим клиентам телеграмму: «Цены на акции резко упадут; продавайте завтра». Очень скоро все узнали о совете Гринвилла, и 7 января стало самым черным днем во всей истории Нью-Йоркской фондовой биржи. По общему мнению, акции потеряли в цене где-то 40 миллиардов долларов».

Таким образом, в ряде случаев прогноз в социально-экономических системах выступает как управляющее воздействие, поэтому рассмотрим кратко известные подходы к описанию управления этим классом систем.

В [32, 42] на основании особенностей воздействия на мотивы поведения людей выделяются следующие методы управления:

-методы *административно-организационного управления*, опирающиеся на волю и авторитет государства, оказывающие прямое безусловное воздействие на объект управления и подкрепляемые авторитетом власти, обосновываемые экономически и обеспечиваемые ресурсно. К этому же классу можно отнести *правовые методы управления*, которые как орудия социального управления осуществляют регулятивные и охранительные подфункции управления;

-*экономические методы управления* – совокупность мер, обеспечивающих рациональное использование экономических законов и отношений в управлении и хозяйственной деятельности в формах общественного, коллективного и индивидуального воздействия;

-*социально-психологические методы управления*, учитывающих индивидуальные особенности отдельных субъектов и коллективов.

Наряду с перечисленными методами управления, в [32, С.78] выделяется *информационное управление* – «процесс выработки и реализации управленческих решений в ситуации, когда управляющее воздействие носит неявный, косвенный характер, и управляемому субъекту представляется определяемая управляющим органом информация о ситуации (информационная картина), ориентируясь на которую этот субъект как бы самостоятельно выбирает линию своего поведения». При этом информационное воздействие рассматривается, в основном, как целенаправленная манипуляция сознанием масс через средства массовой информации («объектом информационного управления является некоторая аудитория» [32, С.107], см. также [78]). В то же время, в [32] приводится анализ влияния типов темпераментов информационно управляемой личности на эффективность управленческих решений. Психологические аспекты *манипуляции* как скрытого (неявного) воздействия на представления и предпочтения людей рассматриваются в [25, 27, 32, 104, 106, 112].

Таким образом, в рамках существующих классификаций (см. также третий раздел настоящей работы) активный прогноз может быть отнесен к информационному управлению.

Проблемы прогнозирования и управления *активными системами* (АС – системами, содержащими управляемых и/или управляющих субъектов, обладающих собственными целями и способностью принимать решения) рассматриваются в [58, 60].

В формальных (теоретико-игровых и/или имитационных) моделях теории активных систем (ТАС – раздел теории управления социально-экономическими системами, изучающий механизмы функционирования организационных систем и их свойства, обусловленные активностью [10, 13, 15]) центр и агенты выбирают стратегии (действия, состояния, сообщаемую информацию) стремясь максимизировать свои целевые функции, отражающие их предпочтения на множестве действий и/или результатов деятельности. Описание активной системы (ее модель) включает: целевые функции игроков, допустимые множества, последовательность выбора стратегий и информационные ограничения.

Рассмотрим задачи, возникающие при прогнозировании поведения АС. Собственно АС погружена в некоторую внешнюю среду, и целью исследователя является создание прогноза развития системы на тот или иной промежуток времени. Как правило, исследователь имеет собственную модель АС (совокупность своих представлений о системе), проводя анализ которой он может определить каково будет состояние модели через интересующий его промежуток времени. Следовательно, возникает проблема адекватности модели моделируемой системе. Исследованию этой проблемы посвящено значительное число работ (см. подробности в [66]). Останавливаться на обсуждении полученных в них результатов мы не будем. Обсудим кратко другой аспект отношений исследователя и исследуемой системы.

Так как участникам АС свойственна активность, отличающая их от полностью предсказуемых пассивных (например, технических) систем, то знание прогноза может повлиять на их поведение. Как было отмечено выше, такая обратная связь может, в частности, приводить к самоосуществлению или самоаннулированию прогноза: оглашение результатов социологического опроса об отношении к кандидатам (прогноз исхода выборов) может повлиять на результаты голосования; опубликование прогноза конъюнктуры фондового рынка может изменить стратегии поведения его участников и т.д.

Активные системы, для которых знание прогноза не изменяет их поведения (результат совпадает с прогнозом с точки зрения активности, но не адекватности модели), в работе [122] было предложено называть *прогнозируемыми*. Приведем основные результаты. Рассматривалась задача прогнозируемости поведения активных систем в следующем смысле: если прогноз оказывает воздействие на поведение системы, то существует ли прогнозирующая теория (forecasting theory, интерпретируемая как отображение последовательности свершившихся событий в последовательность будущих событий), которая с учетом ее влияния на поведение участников системы правильно предсказывает будущие события? Для ответа на этот вопрос вводится понятие «общества» как совокупности его членов – субъектов, характеризующихся отображениями прогнозной информации в действия, а действий – в будущие состояния системы, и приводятся условия, которым должно удовлетворять это «общество» (точнее – те отображения, которые характеризуют членов общества) для того, чтобы прогнозирование было возможно. С одной стороны, для каждой прогнозирующей теории множество обществ, в которых с ее помощью возможно прогнозирование, непусто. С другой стороны, не существует универсальной (применимой в оговоренном выше смысле для любого «общества») прогнозирующей теории [122].

С нашей точки зрения предложенное определение прогнозируемой системы является не совсем удачным (см. также [28]). Во-первых, интуитивно, система прогнозируема, если для нее можно построить более или менее точный прогноз. Во-вторых, что более важно, прогноз является средством управления активной системой. Приведем некоторые качественные результаты, обосновывающие и конкретизирующие это утверждение.

Для активных систем, функционирующих в условиях неопределенности, доказано, что в ряде случаев (условия приведены в [67, 69]) механизмы с платой за информацию³ имеют более высо-

³ Данный класс механизмов управления характеризуется тем, что менее информированный субъект осуществляет побочные платежи более информированному субъекту за получение некоторой достоверной информации (возможность предоставления недостоверной информации в известных моделях не рассматривалась).

кую эффективность, чем "классические" механизмы управления, использующие непосредственное устранение существующей неопределенности. Действительно, если результат деятельности агента зависит от случайного параметра, то информация о будущем значении этого параметра (даже имеющая форму прогноза), уменьшающая неопределенность и приобретаемая за плату (плата за прогноз), существенно увеличивает возможности центра в управлении агентами. Возникающая при этом задача поиска компромисса (чем выше плата, тем точнее информация, но, в тоже время растут и затраты на приобретение информации) при известном решении задачи управления сводится к стандартной задаче условной оптимизации [69].

При решении задачи управления в многоэлементной АС с внешней неопределенностью и асимметричной информированностью [63, 69] оказывается оптимальным поощрять одного из агентов только за сообщение информации, а не за выбор состояния (создание собственной "службы прогнозирования"). Использование центром сообщаемой этим агентом достоверной информации (идеальный прогноз) позволяет добиться максимальной эффективности механизма управления.

Знание прогноза может оказаться выгодным не только центру, но и агентам. Например, в теории реализуемости знание агентами предпочтений друг друга является достаточным условием построения механизма, реализующего функции коллективного выбора [68, 117, 118]. Если существуют несколько точек равновесия, и элементы имеют разные прогнозы, то итоговая точка равновесия, фактически, определяется прогнозом (в случае использования концепции равновесия Штакельберга, это свойство выражено наиболее ярко). Более того, роль прогноза может оказаться как позитивной, так и негативной: новая точка равновесия может как Парето-доминировать исходную, так и наоборот.

В [60] активный прогноз рассматривается как метод управления. Под активным прогнозом в этой работе понимается сообщение центром некоторой информации элементам АС – агентам. Сообщение центра может отражать его знания об окружающей среде, быть прогнозом поведения данной АС (или других АС) и т.д.

В упомянутой выше работе отмечается, что факторы, воздействующие на точность прогноза можно разделить на две группы. Первая – это соотношение между информированностями центра и агентов и вторая – возможность целенаправленного влияния центра на состояние АС путем сообщения информации (собственно, аспект активного прогноза). При этом следует иметь в виду, что прогнозируемое (с учетом влияния сообщенной информации) состояние системы может не соответствовать той информации, которая становится достоянием гласности⁴. Такое понимание «точности» активного прогноза соответствует максимальной гарантированной управляемости в теории управления [121]. Подробно вопрос об определении точности активного прогноза рассматривается ниже в седьмом разделе.

Таким образом, рассмотренное взаимодействие между центром и агентами является не просто прогнозированием, а именно управлением. При этом пассивный прогноз является частным случаем и соответствует определению центром (на основании имеющейся у него информации) возможных состояний АС без сообщения информации или с ее сообщением при условии, что получаемая информация не изменяет поведения системы.

Как будет видно из последующего изложения, активный прогноз тесно связан с восприятием субъектом информации о принципах принятия решений им и другими субъектами. Поэтому в заключение настоящего раздела перечислим кратко научные направления, исследующие такую разновидность информационного управления как рефлексивное управление (см. третий и четвертый раздел). Как отмечается в [58], в отечественной литературе термин "рефлексия" (от лат. reflexio – обращение назад) впервые стал использоваться в 30–40-х годах прошлого века. Следует отметить, что на сегодняшний день существует несколько трактовок терминов «рефлексия» и «рефлексивное управление». В том числе, в рамках подходов школы В.А. Лефевра [45] (включая развитие модели рефлексивного поведения человека в работах [39, 46, 48,

⁴ Отдельно следует отметить, что в активном прогнозировании существенно, чтобы результат прогнозирования был доведен до сведения участников АС, так как в противном случае он заведомо не окажет влияния на их поведение.

94, 105, 107]), подходов «методологической школы» [2, 3, 26, 109], подходов "психолого-педагогического" направления [8, 57, 88, 98, 100 и др.], "рефлексивности по Дж. Соросу" [29, 30, 31, 91], и многих других (см., например, [56, 82, 83, 84]).

Для того чтобы перейти к описанию формальных моделей активного прогноза, в следующем разделе рассматривается модель принятия решений участниками АС (модели индивидуального и коллективного поведения), в рамках которой в третьем разделе определяется понятие управления и выделяются его основные типы.

2. МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Рассмотрим *активную систему* (АС), состоящую из двух участников – *центра* и *агента*, обладающих собственными предпочтениями и способностью самостоятельно предпринимать некоторые действия. В моделях управления социально-экономическими системами центр играет роль управляющего органа, агент – роль управляемого субъекта, причем первоначально распределение «ролей» может не быть фиксированным (см. модели сетевого взаимодействия в [71]).

Опишем модель принятия решений агентом. Для того чтобы определить, как задаются предпочтения агента (и центра), введем следующее описание взаимодействия агента с его *обстановкой*, в которую могут входить другие агенты, управляющие органы и прочие объекты и субъекты (как принадлежащие рассматриваемой АС, так и являющиеся элементами внешней среды).

Пусть агент способен выбирать некоторое *действие* (стратегии, состояния и т.д.) из множества A – множества допустимых действий данного агента. Действие будем обозначать y , $y \in \hat{I} A$. В результате выбора действия $y \in \hat{I} A$ под влиянием обстановки реализуется результат деятельности агента, который будем обозначать $z \in \hat{I} A_0$, где A_0 – множество возможных результатов деятельности. Возможное несовпадение действия агента и результата его деятельности может быть обусловлено влиянием обстановки – внешней среды, действий других участников АС и т.д.

Связь между действием агента $y \hat{I} A$ и результатом $z \hat{I} A_0$ его деятельности может иметь сложную природу и описываться распределениями вероятности, нечеткими информационными функциями и др. (см. ниже и [69]).

Будем считать, что агент обладает *предпочтениями* над множеством результатов $z \hat{I} A_0$, то есть, имеет возможность сравнивать различные результаты деятельности. Предпочтения агента обозначим R_{A_0} , множество возможных предпочтений – \mathfrak{R}_{A_0} .

Часто предпочтения агента из множества \mathfrak{R}_{A_0} можно параметризовать переменной r , принимающей значения из подмножества W действительной оси, $W \subseteq \hat{A}^1$. То есть, каждому возможному предпочтению агента $R_{A_0} \hat{I} \mathfrak{R}_{A_0}$ ставится во взаимно однозначное соответствие значение параметра $r \hat{I} W$, называемого *типом* агента.

При выборе действия $y \hat{I} A$ агент руководствуется своими предпочтениями и тем, как выбираемое действие влияет на результат деятельности $z \hat{I} A_0$, то есть – некоторым законом $W_I(x)$ изменения результата деятельности в зависимости от действия и обстановки, информация о которой отражена переменной I . Выбор действия агентом определяется *правилом индивидуального рационального выбора* $P^{W_I}(\mathfrak{R}_{A_0}, A, I) \hat{I} 2^A$, которое выделяет множество наиболее предпочтительных с точки зрения агента действий.

Правило индивидуального рационального выбора определим следующим образом. Примем две гипотезы:

- *гипотеза рационального поведения*, заключающаяся в том, что агент с учетом всей имеющейся у него информации выбирает действия, которые приводят к наиболее предпочтительным результатам деятельности (данная гипотеза не является единственно возможной – см., например, концепцию ограниченной рациональности [85]);

- *гипотеза детерминизма*, заключающаяся в том, что агент стремится устранить с учетом всей имеющейся у него информации существующую неопределенность и принимать решения в условиях полной информированности [34] (другими словами, окончательный критерий, которым руководствуется лицо, принимающее

решения (ЛПР), не должен содержать неопределенных параметров).

Пояснений требуют два понятия – использование «всей имеющейся информации» и «наиболее предпочтительные результаты деятельности».

Начнем со второго понятия. Существуют несколько способов задания индивидуальных предпочтений. Наиболее распространены два из них – отношения предпочтения (бинарные [110], метризованные [50, 68] и др.) и функции полезности [100]. Бинарное отношение определяет для пары альтернатив, какая из них является «лучше», функция полезности каждой альтернативе ставит в соответствие действительное число – полезность этой альтернативы. В соответствии с гипотезой рационального поведения агент выбирает альтернативу из множества «лучших» альтернатив. В случае функций полезности это множество является множеством альтернатив, на которых достигается максимум функции полезности, в случае отношений предпочтения множество выбора определяется более сложным образом (см. [68, 73, 74, 100]), зависящим от свойств отношения предпочтения.

Выше речь шла о «наилучшей» альтернативе. Но, если предпочтения агента определены на множестве результатов деятельности, зависящих, помимо его действий, от обстановки, то в общем случае не существует однозначной связи между действием агента и результатом его деятельности. Поэтому, принимая решение о выбираемом действии, агент должен предсказывать – к каким результатам могут привести те или иные действия (здесь существенна та информация, которую он имеет относительно обстановки) и анализировать предпочтительность соответствующих результатов деятельности. Процесс перехода от предпочтений R_{A_0} на множестве A_0 к индуцированным предпочтениям⁵ R_A на множестве A , основывающийся на законе $W_I(x)$, называется *устранением неопределенности*. В случае, когда предпочтения агента исходно описывались функцией полезности, его индуцированные предпоч-

⁵ Термин «индуцированные предпочтения» обусловлен тем, что предпочтения на множестве действий порождаются (индуцируются) предпочтениями на множестве результатов деятельности и законом взаимосвязи между действиями и результатами.

тения будут описываться *целевой функцией*, которая каждому действию агента ставит в соответствие некоторое действительное число (которое может интерпретироваться как его «выигрыш» от выбора этого действия).

При рассмотрении математических моделей принятия решений будем различать для фиксированного субъекта – участника системы (основание классификации – объекты и субъекты, относительно которых имеется недостаточная информация) – *объективную неопределенность* (неполная информированность относительно параметров обстановки, которые не зависят от участников рассматриваемой системы) и *субъективную неопределенность* (неполную информированность о принципах поведения других субъектов, то есть об активно изменяемых параметрах). Неопределенность относительно параметров, описывающих участников АС, называется *внутренней неопределенностью*, относительно внешних (по отношению к АС) параметров – *внешней неопределенностью*. Внешняя объективная неопределенность называется *неопределенностью природы* (или *неопределенностью состояния природы*), внутренняя субъективная неопределенность называется *игровой неопределенностью*.

Ниже будет использоваться следующая модель предпочтений и информированности агента. Пусть предпочтения агента на множестве возможных результатов его деятельности заданы функцией полезности $v(x)$, а результат деятельности $z \in A_0$ зависит от действия $y \in A$ и обстановки $q \in Q$ известным образом⁶: $z = w(y, q)$. Тогда закон $W(x)$ определяется функцией⁷ $w(x)$ и той информацией I , которой обладает агент на момент принятия решений о выбо-

⁶ Использование такого описания не снижает общности, так как в многоэлементных системах партнеры каждого агента могут рассматриваться как внешняя для него среда, и их стратегии будут образовывать «состояние природы» (которое, правда, будет для каждого из агентов свое) – см. описание игровой неопределенности ниже.

⁷ Отображение, связывающее действия и обстановку с результатами деятельности, может рассматриваться как «технология» функционирования некоторого объекта, управление которым осуществляет агент (см. рисунок 1).

раемом действии. Структура модели принятия решений агентом изображена на рисунке 1.

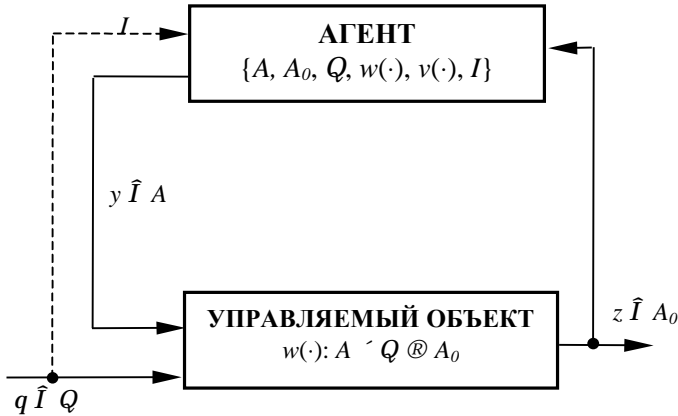


Рис. 1. Структура модели принятия решений агентом

Детализируем, что понимается под информацией, и каким образом устраняется неопределенность того или иного типа.

Рассмотрим сначала объективную неопределенность (внешнюю или внутреннюю). Тогда существенной для агента является информация об обстановке, в качестве которой (различных видов неопределенности) могут выступать:

- множество возможных значений обстановки $Q' \hat{I} Q$. Соответствующая неопределенность называется *интервальной неопределенностью* и устраняется использованием *максимального гарантированного результата* (МГР): $f(y) = \min_{q \in \Theta'} v(w(y, q))$, или

оптимистических оценок: $f(y) = \max_{q \in \Theta'} v(w(y, q))$, или их комбинаций и т.д. [18, 22];

- распределение вероятностей $p(q)$ на множестве $Q' \hat{I} Q$. Соответствующая неопределенность называется *вероятностной неопределенностью* и устраняется использованием ожидаемых значений (EUA – expected utilities analysis): $f(y) = \int_{q \in \Theta'} v(w(y, q)) p(q) dq$, быть может, с учетом риска (дисперсии полезности) и моментов более высоких порядков [11, 22, 69];

- функция принадлежности $m_Q(q)$ нечеткого множества $Q' \subseteq Q$. Соответствующая неопределенность называется *нечеткой неопределенностью* и устраняется выделением множества максимально недоминируемых действий [69, 73].

До сих пор мы рассматривали индивидуальное принятие решений. Рассмотрим теперь игровую (внутреннюю субъективную) неопределенность, в рамках которой существенными являются предположения агента о множестве возможных значений обстановки (действий других агентов, выбираемых ими в рамках тех или иных неточно известных рассматриваемому агенту принципов поведения) в зависимости от его действий, то есть $Q' = Q'(y)$.

Для описания коллективного поведения агентов, входящих в некоторую *многоэлементную АС* (включающую центра и нескольких агентов), недостаточно определить их предпочтения и соответствия рационального индивидуального выбора по отдельности. Как отмечалось выше, в случае, когда в системе имеется единственный агент, гипотеза его рационального (индивидуального) поведения предполагает, что агент ведет себя таким образом, чтобы выбором действия максимизировать значение своей целевой функции. В случае, когда агентов несколько, необходимо учитывать их взаимное влияние – в этом случае возникает *игра* – взаимодействие игроков (участников некоторой системы), в котором полезность каждого игрока зависит как от его собственного действия (стратегии), так и от действий других игроков. Если в силу гипотезы рационального поведения каждый из игроков стремится выбором стратегии максимизировать свою целевую функцию, то, понятно, что в случае нескольких игроков индивидуально рациональная стратегия каждого из них зависит от стратегий других игроков. Набор таких рациональных стратегий называется *решением игры (равновесием)*.

Каждому из n игроков (агентов) поставим в соответствие функцию выигрыша $v_i(y)$, где $y = (y_1, \dots, y_n) \in A' = \prod_{i \in N} A_i$ – вектор *действий* всех игроков, $N = \{1, 2, \dots, n\}$ – *множество игроков*. Следуя сложившейся терминологии теории игр, будем называть действия y_i *стратегиями*, а вектор y – *ситуацией игры*. Совокуп-

ность стратегий $y_{-i} = (y_1, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_n)$ называется *обстановкой игры* для i -го игрока.

Таким образом, рациональному коллективному поведению соответствует выбор игроками равновесных стратегий (тип равновесия – см. ниже – должен оговариваться в каждом конкретном случае). Отметим, что любые концепции равновесия должны быть согласованы (при $n = I$) с введенными выше принципами индивидуального рационального выбора.

Более того, в теоретико-игровых моделях можно считать, что обстановка игры определяет состояние природы для рассматриваемого игрока (агента), то есть $q_i = y_{-i}, i \in \hat{I} \ N$, а результат деятельности будет один для всех игроков – ситуация игры, то есть $z_i = y, i \in \hat{I} \ N$. Информация игрока и те предположения, которые он использует о поведении других игроков [13, 22, 113, 117, 119], отражают его принцип устранения неопределенности в рамках гипотезы детерминизма. Совокупность принципов устранения неопределенности, используемых игроками, порождает тип равновесия игры (принципу максимального гарантированного результата соответствует максиминное равновесие, принципу усреднения – равновесие Байеса, предположению о фиксированной обстановке y_{-i}^* , то есть $Q'(y_i) = y_{-i}$, соответствует равновесие Нэша и т.д.) – устойчивой в том или ином (оговариваемом в каждом конкретном случае) смысле совокупности действий участников системы.

Другими словами, субъективная (игровая) неопределенность, как правило, устраняется введением тех или иных предположений о принципах поведения участников системы, позволяющих однозначно доопределить выбираемые ими стратегии (то есть устранение субъективной неопределенности производится в два этапа – на первом этапе определяется концепция равновесия, на втором этапе определяется принцип выбора игроками конкретных равновесных стратегий в случае, если последних несколько (гипотеза благожелательности, принцип гарантированного результата и т.д.)).

«Предельным» для всех перечисленных выше типов и видов неопределенности является случай "детерминированного" изменения результата деятельности – когда он не зависит от обстановки (или, что то же самое, когда множество Q' состоит из единственного элемента), то есть каждому действию $y \in \hat{I} \ A$ соответствует

единственный результат деятельности $z = w(y) \hat{I} A_0$. При этом можно сразу считать, что предпочтения агента заданы на множестве его действий. Если $v(x)$ – функция полезности агента, то его целевая функция $f(x)$ в детерминированном случае определяется как $f(y) = v(w(y))$.

Правило индивидуального рационального выбора в детерминированном случае заключается в выборе агентом действий, доставляющих максимум его целевой функции, то есть

$$P^{W_1}(\mathfrak{X}_{A_0}, A, I) = \text{Arg} \max_{y \in A} f(y).$$

Таким образом, гипотеза детерминизма проявляется в том, что агент, устраняя неопределенность (то есть, используя МГР, математическое ожидание, отношение недоминирования, предположения о поведении других агентов и т.д. – в зависимости от типа и вида неопределенности), переходит от предпочтений, зависящих от неопределенных факторов, к индуцированным предпочтениям, зависящим от его собственных действий. Гипотеза рационального поведения проявляется в том, что агент выбирает действия, наилучшие с точки зрения его индуцированных предпочтений (стремится выбором действия максимизировать свою целевую функцию, в качестве которой может выступать гарантированная полезность, ожидаемая полезность и т.д. – см. выше).

Описав модель принятия индивидуальных и коллективных решений, перейдем к рассмотрению модели управления с тем, чтобы в рамках этой модели выделить, в том числе, место и роль активного прогноза.

3. УПРАВЛЕНИЕ И ЕГО ТИПЫ

В общем случае *управлением* называется воздействие на управляемую систему (управляемый субъект или объект управления), направленное на обеспечение требуемого ее поведения⁸. Классификация управлений может строиться на основании тех компонентов управляемой системы (точнее, ее модели) – агента,

⁸ *Принятие решений агентом также может рассматриваться как выработка управляющих воздействий (см. рисунок 1).*

на которые оказывается воздействие при использовании управлений тех или иных типов (см. различные системы классификаций и моделей в [15, 37, 69, 70, 71, 75, 78]). Примером может служить стимулирование – «комплексное целенаправленное внешнее воздействие на процессуальные компоненты деятельности управляемой системы и процессы их формирования» [69].

В рамках представления предпочтений агента в терминах функции полезности его **модель принятия решений** описывается следующим кортежем: $Y = \{A, A_0, Q, v(x), w(x), I\}$, то есть множествами: допустимых действий A , допустимых результатов деятельности A_0 , возможных значений обстановок (неопределенности) Q ; функциями: полезности $v(x)$ и связи между действиями, обстановкой и результатом деятельности $w(x)$; а также информацией I , которой обладает агент на момент принятия решений.

Будем считать, что закон $w(x)$ известен всем участникам АС и не может быть изменен. Содержательно это предположение соответствует фиксированной технологии деятельности агента (или фиксированной технологии функционирования управляемого агентом объекта) и не является критическим, так как практически любое изменение связи между действием и результатом может быть отражено зависимостью этой связи от обстановки.

Также без ограничения общности можно считать, что множество обстановок Q известно всем участникам АС и фиксировано (для выполнения этого предположения всегда можно выбрать это множество достаточно широким, ограничивая в каждом конкретном случае возможные значения обстановок имеющейся у агента информацией).

В соответствии с приведенным выше определением, управление – воздействие на управляемую систему. Так как управляемая система (точнее, управляемый субъект – агент) описывается кортежем Y , то внешнее воздействие в общем случае может быть направлено на каждый из элементов этого кортежа. Выделим три группы переменных (элементов кортежа Y , которые могут изменяться) – допустимые множества A и A_0 , функция полезности $v(x)$ и

информация *I*. Этим трем группам переменных⁹ соответствуют *три типа управлений* организационными системами (основание классификации – группа переменных, описывающих модель принятия решений, на изменение которых направлено управление):

- **институциональное управление** (изменение допустимых множеств);
- **мотивационное управление** (изменение функции полезности);
- **информационное управление** (изменение информации, которую агент использует при принятии решений).

Обсудим кратко специфику каждого из введенных типов управлений¹⁰.

Институциональное управление, которое обозначим $u_A \hat{I} U_A$, является наиболее жестким и заключается в том, что центр целенаправленно ограничивает множества возможных действий и результатов деятельности агента. Такое ограничение может осуществляться явными или неявными воздействиями – правовыми нормами (административное и правовое управление), моральными нормами и т.д. Достаточно ярко институциональное управление проявляется в моделях управления многоэлементными организационными системами, в которых центр может запрещать или разрешать совместный выбор агентами определенных комбинаций действий (примеры – производственные цепочки [70], управление проектами [14] и др.) или достижение определенных результатов совместной деятельности (примеры – агрегирование информации в системах управления [65, 70, 103], управление многоуровневыми системами [65, 71] и др.).

Мотивационное управление, которое обозначим $u_v \hat{I} U_v$, является более «мягким», чем институциональное, и заключается в целенаправленном изменении предпочтений (функции полезности)

⁹ Допущение о возможности изменения «технологии» $w(x)$ позволяет выделить еще один тип управления – технологическое управление, то есть управление технологией. Технологическое управление в настоящей работе рассматриваться не будет.

¹⁰ Естественно, на практике иногда трудно выделить в явном виде управление того или иного типа, так как они используются (и должны(!) использоваться) одновременно.

агента. Такое изменение может осуществляться введением системы штрафов и/или поощрений за выбор тех или иных действий и/или достижение определенных результатов деятельности. Широкий класс примеров моделей мотивационного управления составляют задачи планирования и стимулирования [15, 65]. В случае, например, задачи стимулирования, мотивационное управление заключается в непосредственном (входящем в функцию полезности аддитивно) вознаграждении агента за выбор определенных действий.

Наиболее «мягким» (косвенным), по сравнению с институциональным и мотивационным, и, в то же время, наименее исследованным (с точки зрения формальных моделей) является *информационное управление*.

Под **информационным управлением** будем понимать целенаправленное влияние на информацию, используемую субъектами при принятии решений.

Отметим, что в настоящей работе рассматривается, в основном, информационное управление, причем основной акцент делается на исследовании такой его разновидности как активный прогноз (см. определение ниже).

Рассмотрим, какого рода информация может использоваться субъектом при принятии решений в рамках описанной выше (см. рисунок 1) модели. Во-первых, это информация о состоянии природы q (то есть, относительно объективно неопределенных факторов). Во-вторых, это информация о моделях принятия субъектами (рассматриваемым и остальными, входящими в АС) решений (напомним, что модель задается кортежем Y), то есть относительно субъективно неопределенных факторов. И, наконец, в третьих, это может быть информация относительно некоторых параметров, которые мы обозначим $q \hat{I} A_q$, зависящих как от состояния природы, так и от действий субъектов (включая управляемого), например, $q = F(y, q)$.

Соответственно, можно выделить три частных случая (типа) информационного управления (основание классификации¹¹ – объекты и субъекты, информация о которых передается):

- **информационное регулирование** – целенаправленное влияние на информацию о состоянии природы;
- **рефлексивное управление** – целенаправленное влияние на информацию о моделях принятия субъектами решений;
- **активный прогноз** – целенаправленное сообщение информации о будущих значениях параметров, зависящих от состояния природы и действий субъектов¹².

Отметим, что термин *рефлексивное управление* используется во множестве работ [1, 45, 43, 83], и понимается как воздействие, при котором центр оказывает влияние на представления агента о субъективных параметрах других участников АС («передает ему основания для принятия решений» [44, 45, 47, 49]). Описательные, то есть не являющиеся формальными, примеры моделей рефлексивного управления можно найти в [7, 8, 53].

В соответствии с данным выше определением, управление – воздействие на управляемую систему, направленное на обеспечение требуемого ее поведения. Введенные типы управлений характеризуют объекты воздействия (компоненты управляемой системы, на которые направлено управляющее воздействие), поэтому обсудим – что следует понимать под требуемым поведением управляемой системы, и, в первую очередь – «требуемым» с чьей точки зрения.

Исследователь операций, занимающийся построением и анализом модели, как правило, находится на позициях оперирующей (управляющей) стороны, то есть центра. Следовательно, необходимо описать предпочтения центра и рассмотреть модель принятия им решений по выбору управлений.

¹¹ Предлагаемая классификация является одной из возможных (см. обсуждение ниже), позволяющих разделить активный прогноз, информационное регулирование и рефлексивное управление как виды информационного управления.

¹² Частным случаем, которому соответствует $F(x) = w(x)$ является активный прогноз, при котором центр сообщает информацию о будущем результате деятельности агента (агентов или АС в целом). При этом, очевидно, $q = z$.

Модель принятия решений центром в целом аналогична¹³ рассмотренной выше модели принятия решений агентом и описывается кортежем $Y_0 = \{U_A, U_v, U_I, A_0, Q, w(x), v_0(x), I_0\}$. В силу единообразия описания моделей принятия решений, в сложных (многоуровневых иерархических) системах центр может рассматриваться как субъект, управляемый центром более высокого уровня, а агент – как центр, управляющий агентом более низкого уровня (ср. рисунки 1 и 2) [22, 71]

Поясним элементы модели (см. рисунок 2).

«Действиями» центра (выбираемыми им стратегиями) являются управления $u_A \hat{I} U_A$, $u_v \hat{I} U_v$, $u_I \hat{I} U_I$. Обозначим $u = (u_A, u_v, u_I) \hat{I} U = U_A \hat{I} U_v \hat{I} U_I$ – вектор управлений.

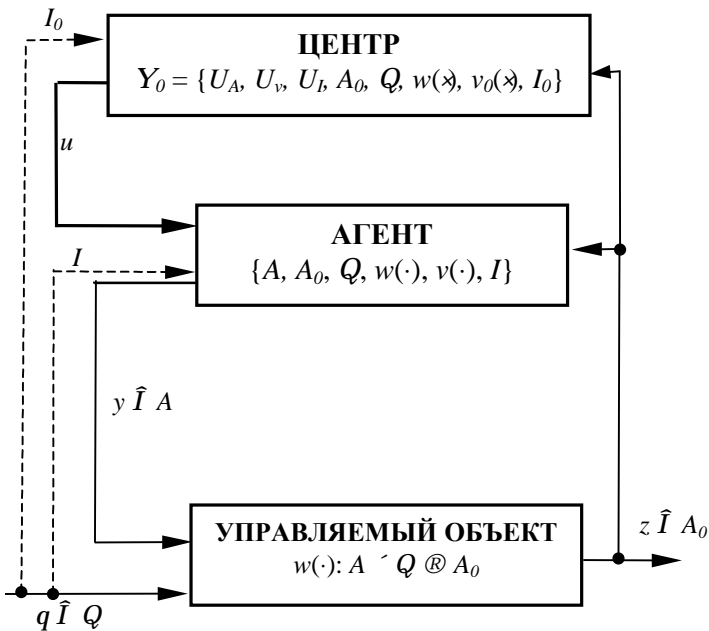


Рис. 2. Структура системы управления агентом

¹³ Нижний индекс «0» обозначает переменные, выбираемые центром. Использование обозначения A_0 для множества результатов деятельности агента следует признать неудачным, но сложившимся исторически.

В большинстве моделей управления организационными системами считается, что единственная роль центра заключается в осуществлении управления, то есть у него отсутствует собственный (не опосредованный агентом) результат деятельности¹⁴, поэтому результатом деятельности центра обычно считают результат деятельности агента, принадлежащий множеству A_0 .

Таким образом, структура системы управления агентом имеет вид, приведенный на рисунке 2 (ср. со структурой модели принятия решений агентом, приведенной на рисунке 1).

Предпочтения центра $v_0(x)$ определены на множестве A_0 возможных результатов деятельности агента, а последние, в свою очередь, зависят от действий агента и обстановки. Обстановка центра (и та информация, которой он о ней обладает), естественно, может отличаться от обстановки агента. Более того, вне рассматриваемой модели управления (но легко вписываемой в нее) остаются неполная информированность центра об агенте (например, о его типе, правилах устранения неопределенности и принятия решений и т.д.). Неполная информированность центра о типе агента учитывается в механизмах управления с сообщением информации [12, 15, 68], неполная информированность центра о принципах принятия решений агентом на сегодняшний день исследована недостаточно полно [17, 23, 35, 36]. Поэтому качественно управление заключается в побуждении центром агента к выбору определенных действий. Обсудим, какие действия выгодны центру.

Предпочтения центра $v_0(x)$, определенные на множестве $A_0 \subset U$, с учетом имеющейся у него информации I_0 индуцируют (устранение неопределенности центром производится по той же схеме, которая описана выше для агента) на множестве $A \subset U$ предпочтения (целевую функцию центра) $f_0(x)$.

Рациональный выбор $P(\cdot)$ агента (см. выше) зависит от управляющих воздействий $u(x) \in \hat{I} \subset U$, используемых центром, то есть

$$P(u) = P^{W1} (\mathfrak{R}_{A_0(u_A)}(u_v), A(u_A), I(u_I)) \hat{I} \subset A.$$

¹⁴ Возможность влияния центра на информацию агента о результате деятельности рассматривается ниже.

Итак, центр может предсказать, что, если он использует некоторое управление $u \in U$, то агент выбирает одно из действий из множества $P(u) \subset A$. Если это множество содержит более одного элемента, то у центра остается неопределенность относительно выбора агента, которая может устраняться одним из описанных выше для интервальной неопределенности методов. Будем использовать далее *гипотезу благожелательности*, в соответствии с которой значение целевой функции центра при использовании управления $u \in U$ равно:

$$K(u) = \max_{y \in P(u)} f_0(y, u).$$

Величина $K(u)$ называется *эффективностью управления* $u \in U$. Следовательно, *задача управления организационной системой* формально может быть сформулирована следующим образом: найти допустимое управление, имеющее максимальную эффективность (такое управление называется *оптимальным управлением*), то есть

$$K(u) \stackrel{\text{®}}{\max}_{u \in U}.$$

Управление $u^* \in U$ будем называть *абсолютно оптимальным*, если существует такое действие $y^* \in A$, что $(y^*, u^*) \in U$ выполнено $f_0(y^*, u^*) \geq f_0(y, u)$. Если при этом $u^* \in P(u^*)$, то оптимальное управление является абсолютно оптимальным¹⁵.

Если предпочтения центра определены на множестве A_0 и отражены его функцией полезности $p_0(x)$, и, кроме того, он может в рамках модели "управлять" результатом деятельности агента, то задача управления будет заключаться в выработке управлений,

¹⁵ Отметим, что выше сформулирована прямая задача управления, заключающаяся в поиске допустимого управления максимальной эффективности. Обратная задача управления заключается в нахождении по заданному множеству действий $A_1 \subset A$ множества управлений $U(A_1) \subset U$, которые являются оптимальными (в том или ином смысле) и обеспечивают выполнение реализуемости действий из множества A_1 (то есть $\forall y \in A_1 \exists u \in U(A_1): y \in P(u)$). Отметим также, что во многих случаях исследование задачи управления заключается в указании множества допустимых управлений, содержащих оптимальное (при этом можно без потери эффективности ограничиться рассмотрением этого множества).

которые приводили бы реализации результатов, максимизирующих функцию полезности центра (см. ниже).

Рассмотренная модель управления позволяет унифицированно описывать процессы принятия решений участниками организационных (активных) систем. Действительно, в многоуровневых системах взаимодействие между участниками различных уровней управления может описываться наращиванием структур, приведенных на рисунках 1 и 2, по «вертикали». Введение нескольких управляющих органов (центров) или нескольких управляемых субъектов (агентов) соответствует «горизонтальному» расширению этих структур.

Игровая неопределенность в принятии решений отражает взаимодействие субъектов, в результате которого выигрыши (полезности и т.д.) каждого из них в общем случае зависят от действий всех участников системы. Предположение о рациональном их поведении, в зависимости от используемого способа устранения неопределенности, приводит к той или иной концепции равновесия игры (см. выше). Равновесие игры управляемых субъектов зависит от используемых центрами управляющих воздействий (принадлежность к определенному уровню иерархии определяется последовательностью принятия решений и возможностью выбирать стратегии, являющиеся «функциями» от стратегий участников, принадлежащих более низким уровням иерархии [22, 65, 71]), поэтому можно считать, что решение задачи управления АС заключается в исследовании, во-первых, равновесия игры управляющих органов и, во-вторых – *управляемого равновесия* игры агентов.

Таким образом, можно считать, что введение структуры (совокупности связей между элементами активной системы, в том числе – обязательства, ответственность и т.д.), разделение прав принятия решений, фиксация процедур принятия решений, порядка функционирования и ограничений на множества допустимых стратегий, превращают группу и коллектив в организацию (напомним, что группой называется набор агентов, осуществляющих совместную деятельность; коллективом называется группа, члены которой обладают общими интересами; организацией называется коллектив с фиксированным механизмом функционирования (совокупностью правил, методов и процедур, регламентирующих

взаимодействие участников системы, в том числе – принятие решений [13, 15])).

Описав модель принятия решений и классифицировав управления, перейдем к рассмотрению влияния сообщений центра на выбор агента.

4. ВЛИЯНИЕ СООБЩЕНИЙ ЦЕНТРА НА ВЫБОР АГЕНТА

При анализе информационного управления вообще и активного прогноза в частности возникает задача описания того, как агенты используют информацию, сообщенную центром.

4.1. ПРИНЦИП ДОВЕРИЯ

Предположим, что некоторый агент имел информацию $Q' \dot{I} Q$ о состоянии природы, а центр сообщил ему, что состояние природы может принимать значения из множества $Q'' \dot{I} Q$. Спрашивается, какой информацией будет руководствоваться агент при принятии решений (устранении неопределенности и т. д. – см. выше). Возможны несколько вариантов. Пусть $X(Q', Q'') \dot{I} Q$ – та информация, которой будет руководствоваться агент, обладавший первоначально информацией Q' и получивший от центра информацию Q'' . Естественно (хотя и не обязательно с точки зрения содержательных интерпретаций) потребовать, чтобы имело место

$$Q' \dot{C} Q'' \dot{I} X(Q', Q'') \dot{I} Q' \dot{E} Q''.$$

Пусть отображение $X(x)$ задано и известно центру и агенту¹⁶. Предположим также, что известна зависимость решений, принимаемых агентом (его действий), от используемой им информации. Тогда задача информационного управления заключается в поиске допустимых сообщений $Q'' \dot{I} Q$, максимизирующих критерий эффективности $K(x)$, заданный на множестве информированностей

¹⁶ Данное предположение является достаточно сильным. Исследование свойств отображений $X(x)$ является предметом самостоятельного и перспективного исследования, которое должно, в свою очередь, опираться на свойства решения задач информационного управления при фиксированных отображениях (ряд примеров рассматривается в настоящей работе – см. девятый раздел).

агента. Так как состояния агента зависят от используемой им при принятии решений информации, то можно задачу информационного управления записать в следующем виде¹⁷:

$$(1) K(X(Q', Q''), \varkappa) \rightarrow \max_{\Theta'' \subseteq \Theta} .$$

Обозначим: $Q''(Q', Q, X(\varkappa)) = \bigcup_{\Theta'' \subseteq \Theta} \Xi(\Theta', \Theta'')$ – множество тех

информированностей агента, которых центр может добиться в рассматриваемой ситуации путем изменения своих сообщений Q'' ; $Q^*(Q', \hat{\Theta}, X(\varkappa))$: $X(Q', Q^*) = \hat{\Theta}$ – такое сообщение центра агенту, которое при имеющейся информированности агента Q' приводит к тому, что он при принятии решений использует информацию Q'' . Тогда сформулированная выше задача информационного управления (1) эквивалентна следующей задаче:

$$(2) K(\hat{\Theta}, \varkappa) \rightarrow \max_{\hat{\Theta} \subseteq \Theta''(\Theta', \Theta, \Xi(\cdot))} .$$

Отметим, что в максимизируемом в (2) выражении информированность агента совпадает с сообщением центра. Таким образом, мы показали, что изменением множества допустимых стратегий центра задача информационного управления может без потери общности решаться в предположении, что агент полностью доверяет центру и использует при принятии решений в точности ту информацию, которую ему сообщил центр. Назовем этот принцип **принципом доверия**. Другими словами, зная отображение $X(\varkappa)$, центр всегда может для заданной информации определить какое ему сообщение следует сделать агенту для того, чтобы он использовал при принятии решений именно эту информацию (аналогом этого утверждения в механизмах с сообщением информации от агентов центру является принцип выявления [68, 119]).

4.2. РЕФЛЕКСИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Поскольку в рамках принятой модели принятия решений действия агента определяются ни чем иным, как его представлениями о: состоянии природы, собственной целевой функции и целевых функциях и принципах поведения (то есть, моделях принятия

¹⁷ В настоящей работе принята независимая внутри подразделов нумерация формул.

решений – см. второй раздел) других агентов, то ключевым является вопрос о том, каким образом те или иные сообщения центра влияют на эти представления. Иными словами, как меняются субъективные представления агента в зависимости от сообщений центра (отметим, что вопрос о несовпадении *субъективного* и *объективного* описаний игры обсуждался в [22]). Для простоты изложения будем далее считать, что центр сообщает агенту одно значение (а не интервал, вероятностное распределение и т.п.). Будем также считать, что агент доверяет сообщениям центра (т.е. действует в соответствии с принципом доверия).

В целом вопрос о реагировании агентов на те или иные сообщения центра является, вообще говоря, сложным и неоднозначным. В большинстве случаев относительно этого реагирования необходимо принимать определенные гипотезы или предположения (отметим, что это одновременно предположения центра и исследователя операций, то есть мы не разделяем позиции исследователя и центра), некоторые из которых мы рассмотрим далее.

Предположение Π_1 . Пусть центр сообщает i -му агенту q_i – значение неизвестного параметра q (т.е. центр осуществляет информационное регулирование). В этом случае предположение Π_1 заключается в том, что агент считает, что это же значение известно остальным агентам, и при выборе своего действия они подставляют его в целевые функции вместо q . Схематически это можно выразить при помощи следующего рисунка (см. рисунок 3), на котором прямоугольником обозначено представление агента, номер которого находится в левом верхнем углу (центр считается агентом с номером 0). i -й агент ($i = 1, 2, \dots, n$) принимает решение, имея перед собой n целевых функций ($k = 1, 2, \dots, n$), в каждую из которых вместо q подставлено значение q_i . Иными словами, в рамках Π_1 агент предполагает, что то же значение q_i используется и всеми остальными агентами.

Наряду с графическим, возможно и эквивалентное алгебраическое описание. Именно, пусть $f_{ij}(y)$ – целевая функция j -го агента с точки зрения i -го агента. Тогда рисунок 3 соответствует следующей формуле¹⁸: $f_{ij}(y) = f_j(y, q_i)$, $i, j = 1, 2, \dots, n$.

¹⁸ В используемой ниже записи мы неявно переходим от функции полезности к целевой функции (см. второй раздел).

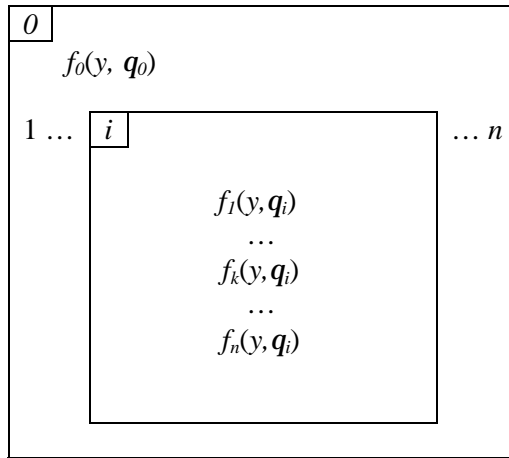


Рис. 3

Описанная модель Π_1 реакции агента на сообщение q_i не является единственно возможной. Например, агент может считать, что другим агентам значение параметра неизвестно, либо известно какое-либо иное значение (не равное q_i), либо они формируют свои представления об информированности прочих агентов каким-то другим образом (то есть i -й агент считает, что j -й агент подставляет в функцию полезности k -го агента не q_i , а некоторое другое значение) и т.п. Однако в дальнейшем изложении мы будем исходить из предположения Π_1 в тех случаях, когда агенту сообщается значение неизвестного параметра.

Одним из аргументов в пользу такого подхода является следующий. Предположение Π_1 является, по-видимому, единственно возможным в том предельном случае, когда все q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) равны между собой и сообщаются агентам «публично», то есть каждый агент доподлинно знает, какое сообщение получили остальные агенты (а также знает, что это его знание известно остальным агентам и т.д.). В этом случае сообщение центра представляет собой так называемое «общее знание» (common knowledge, см., например, [113]).

Таким образом, предположение Π_1 описывает реакцию агента на сообщения центра в рамках информационного регулирования.

Максимальное число "отражений", присутствующих в информации агента, будем называть *глубиной его рефлексии* (в качестве синонимов могут использоваться термины "*ранг рефлексии*" и "*уровень рефлексии*"). Отметим, что предположение типа Π_1 соответствует нулевому уровню рефлексии (агент обладает информацией, но "отражения" не происходит). Более ярко эффекты рефлексии (рефлексии первого ранга) проявляются в рамках следующего предположения.

Предположение Π_2 . Пусть центр сообщает i -му агенту не только значение неизвестного параметра, но и то, что о значении параметра думают другие агенты (эта ситуация соответствует рефлексивному управлению). Таким образом, i -му агенту сообщается набор чисел q_{ij} ($j = 1, 2, \dots, n$) – представлений о неизвестном параметре каждого j -го агента. В этом случае i -й агент считает, что каждый j -й агент при выборе своего действия подставляет в свою целевую функцию и целевые функции других агентов вместо q значения $\{q_{ij}\}$. Схематически это можно выразить при помощи следующего рисунка (см. рисунок 4).

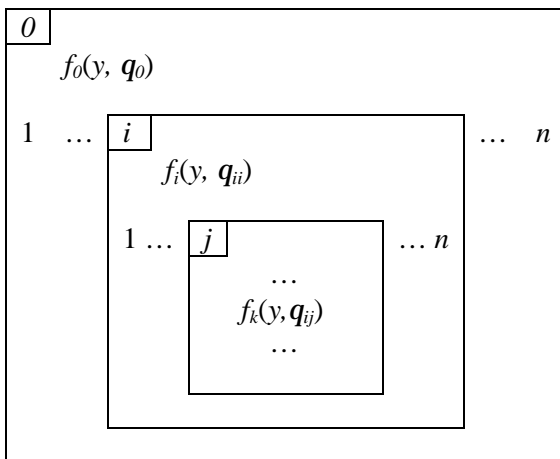


Рис. 4

Вложенность прямоугольников означает рефлекссию первого уровня (рода, ранга и т.д.) – представление одного агента о другом. Например, $f_k(y, q_{ij})$ – целевая функция k -го агента с точки зрения j -го агента в представлении i -го агента.

Приведем соответствующее рисунку 4 алгебраическое описание. Пусть $f_{ijk}(y)$ – целевая функция k -го агента с точки зрения j -го агента в представлении i -го агента. Тогда

$$f_{ijk}(y) = f_k(y, q_{ij}), i, j, k = 1, 2, \dots, n.$$

Смысл предположения Π_2 (оно также не является единственно возможной гипотезой при описании реально возникающих ситуаций принятия решения) состоит в том, что i -й агент осознает себя, вообще говоря, как более информированного по сравнению с другими.

Рассмотрим иллюстративный пример. В [104, С.235] описан психологический эксперимент, проведенный изучавшим психологию бизнесменом, владельцем компании, импортирующей в США говядину. «Торговые агенты позвонили, как обычно, постоянным клиентам компании – закупщикам говядины для супермаркетов и других точек, торгующих продуктами в розницу, и одним из трех способов предложили им сделать заказ. Одни клиенты услышали предложение, сделанное в стандартной форме. Другим клиентам дополнительно была предоставлена информация о том, что поставки импортной говядины будут сокращены в ближайшие несколько месяцев. Третья группа клиентов получила те же сведения, что и вторая группа, а также информацию о том, что мало кто узнает о предстоящем сокращении поставок, так как эти сведения поступили из надежного, но засекреченного источника.

...По сравнению с клиентами, которым было сделано торговое предложение в стандартной форме, те клиенты, которым было также сказано о дефиците говядины, заказали ее в два раза больше... Клиенты, которые решили, что владеют «исключительной» информацией...приобрели в шесть раз больше говядины, чем клиенты, которым было сделано торговое предложение в стандартной форме».

Отметим, что в психологии в подавляющем большинстве случаев ограничиваются предположениями типа Π_1 или Π_2 : "в сложном процессе рефлексии даны, как минимум, шесть позиций, характеризующих взаимное отображение субъектов: сам субъект,

каков он есть в действительности, субъект, каким он видит самого себя (*авторerefлексия* в терминах [58] – авт.), субъект, каким он видится другому (предположение Π_2 – авт.), и те же три позиции, но со стороны другого субъекта" [38]. Авторerefлексии в терминах предположения Π_2 соответствует наличие у i -го агента информации q_{ii} .

С точки зрения задач управления существенную роль играют более глубокие уровни рефлексии (чем авторerefлексия и рефлексия глубины два), предположения о поведении агентов в рамках которых рассматривается ниже.

Предположение $\Pi_m, m > 2$. Центр может дать агенту более сложную «рефлексивную» информацию, сообщая набор чисел $q_{i_1 i_2 \dots i_m}$, где каждый из индексов i_1, i_2, \dots, i_m пробегает все значения от 1 до n включительно. В рамках информированности $q_{i_1 i_2 \dots i_m}$ агент обладает уровнем рефлексии $m - 1$.

Пусть $f_{i_1 i_2 \dots i_m k}(y)$ – целевая функция k -го агента с точки зрения i_m -го агента с точки зрения ... с точки зрения i_2 -го агента в представлении i_1 -го агента. Тогда

$$f_{i_1 i_2 \dots i_m k}(y) = f_k(y, q_{i_1 i_2 \dots i_m}), \quad i_1, i_2, \dots, i_m, k = 1, 2, \dots, n.$$

Таким образом, ранг (уровень, глубина и т.д.) рефлексии определяется максимальным числом "отражений", фигурирующих в обозначении информированности субъекта. Так, субъект, имеющий информацию $q_{i_1 i_2 \dots i_m}$, характеризуется глубиной рефлексии $(m - 1)$. Следовательно, предположения $\Pi_m, m \geq 2$, относятся к рефлексивному управлению.

Наряду с предположениями Π_m о реакции агентов на сообщения о состоянии природы q , введем аналогичные предположения (обозначая их штрихом – Π_m') относительно реакции агентов на сообщения центра о действиях y .

Центр может сообщать i -му агенту сразу действия всех остальных агентов (то есть вектор $(y_{i1}, \dots, y_{i,i-1}, y_{i,i+1}, \dots, y_{in})$), или некоторых из них. Возможность такого сообщения можно понимать двояко: либо центру просто известно о свершившемся факте выбора агентами действия, либо центр, обладая абсолютно полной

информацией о представлениях и планах агентов, безошибочно определяет их действия.

Введем следующее **предположение Π_1'** относительно реакции i -го агента: он подставляет известные ему значения $y_{ij}, j \neq i$, в свою целевую функцию. В этом случае i -му агенту не обязательно знать целевые функции или субъективные представления агентов, действия которых ему сообщили, поэтому отнесем случай Π_1' , наряду с Π_1 , к информационному регулированию (в [24, С. 60] сообщение центром агенту информации о действии другого агента называется прогнозированием, однако в настоящей работе принята другая терминология). Вообще говоря, центр может составлять комбинированные сообщения: об одних агентах сообщать их представления, о других – действия и т.д.

Отметим, что сообщение действия y_{ij} как *факта* следует отличать от такого же сообщения как *прогноза*, который центр формирует, исходя из собственной (вообще говоря, ограниченной) информированности о неизвестных параметрах и представлениях агентов. В первом случае сообщение центра i -му агенту выглядит примерно так: доподлинно известно, что j -й агент выбрал (выберет) действие y_{ij} , это факт. Во втором случае центр сообщает i -му агенту несколько иное: при сложившихся объективных и субъективных обстоятельствах наилучшим для j -го агента является действие y_{ij} , поэтому можно прогнозировать именно это действие.

Можно рассматривать сообщение центром представлений агентов о совершенных действиях других агентов – чисел y_{ijk} . В этом случае примем **предположение Π_2'** – агент подставляет известные ему действия y_{iik} в свою целевую функцию и считает, что каждый j -й агент (действие которого еще не известно) подставляет в свою целевую функцию действия $y_{ijk}, j \neq i$. Этот случай, как и аналогично описываемые **предположения Π_m' , $m > 2$** , отнесем к рефлексивному управлению.

Выше мы рассмотрели предположения Π_m и Π_m' относительно реагирования агентов, соответствующих $(m - 1)$ -му уровню рефлексии. Возникает вопрос – от чего зависит глубина рефлексии агента? Мы будем считать, что этот уровень определяется совокупностью информированности агента и сообщений центра, то есть агент не увеличивает уровень своей рефлексии «самопроизвольно». Иными словами, если агенту для принятия решения

достаточно имеющейся у него информации, то углубления рефлексии не происходит. Например, если центр сообщает агенту (в отсутствии у последнего какой-либо «своей» информации) величину q , то реакция агента на это сообщение соответствует Π_1 , если сообщением является набор $\{q_{ij}\}$, то Π_2 и т. д. Назовем это предположение *принципом достаточной рефлексии*.

Поясним сказанное следующим примером. Пусть центр собрал вместе всех агентов и во всеуслышание сообщил им значение неизвестного параметра q – величину \tilde{q} (то есть $q_1 = q_2 = \dots = q_n = \tilde{q}$). Некий агент может, однако, заподозрить, что какие-то из остальных агентов владеют какой-либо особой неизвестной ему информацией относительно q , либо относительно представления о q других агентов и т. п. Принцип достаточной рефлексии утверждает, что такие подозрения не будут иметь места.

Если отказаться от принципа достаточной рефлексии, то агент может, вообще говоря, при любом уровне своей информированности подозревать, что другие агенты знают нечто, чего он не знает, то есть что они принимают решение на основе недоступной ему информации, поэтому смоделировать их поведение невозможно. Таким образом, неограниченно (и безосновательно) рефлексирующий агент оказывается в ситуации полной неопределенности относительно возможных предпочтений других агентов.

Отметим следующее важное обстоятельство. В настоящей работе мы предполагаем, что каждый агент воспринимает себя либо как информированного так же, как остальные агенты, либо как более информированного, чем каждый из остальных. Формально это означает следующее: находясь в ситуации Π_1 , агент считает, что и остальные агенты находятся в ситуации Π_1 ; находясь в ситуации Π_m , $m > 1$, агент считает, что остальные агенты находятся в ситуации Π_{m-1} .

Это предположение, по-видимому, является довольно естественным при моделировании поведения человека – см., напр., [20, С. 248]. Отказ от этого предположения означает, что агенты могут осознавать некоторых из остальных как столь же информированных, как они сами, а других – как менее информированных. Для этого надо допустить возможность более сложно организо-

ванных сообщений центра, чем те, которые были рассмотрены выше. Например, при сообщении i -му агенту набора $\{q_{ij}\}$ центр может оговорить, что агенты с номерами j_1, j_2, \dots, j_k владеют в точности такой же информацией, что и i -й агент (при этом, в частности, одинакова информированность о значении неизвестного параметра: $q_{ij_1} = q_{ij_2} = \dots = q_{ij_k} = q_{ii}$) – см. пример выше. Тогда, с точки зрения i -го агента, имеет место *информационная дискриминация* следующего вида: агенты с номерами i, j_1, j_2, \dots, j_k находятся в привилегированном положении (им известно как значение неизвестного параметра, так и информированность других агентов), в то время как остальным агентам сообщено лишь значение неизвестного параметра (и их реакция на него описывается предположением Π_1). Рассмотрение ситуаций, в которых участвуют агенты с разной глубиной рефлексии, представляется перспективным направлением дальнейших исследований.

5. ИНФОРМАЦИОННОЕ РАВНОВЕСИЕ

В соответствии с описанной выше моделью принятия решений агентом, выбираемое им действие определяется, в частности, той информацией, которой он обладает о неопределенных параметрах. Следовательно, возможность воздействия на поведение агента (то есть, возможность управления) обусловлена, в том числе, возможностью влияния на информацию.

Как отмечалось в третьем разделе, информационное управление заключается в целенаправленном воздействии на информацию, используемую агентами при принятии решений. В зависимости от содержания сообщаемой центром информации выделялись: информационное регулирование, рефлексивное управление и активный прогноз. Трактовка активного прогноза (АП) как средства информационного управления позволяет определить его качество. Понятно, что совпадение состояний системы в случае пассивного и активного прогноза, прогнозируемость системы в смысле [122] и т.д., не являются свидетельствами высокого качества АП. Так как

АП является управлением¹⁹, то *качество АП* определяется эффективностью управления, то есть значением критерия эффективности субъекта, делающего прогноз, на множестве состояний системы (поведение которой прогнозируется), в которых она оказывается с учетом и в результате прогноза (по информации, полученной в результате АП, агенты могут восстановить информацию об обстановке и использовать эту информацию при принятии решений (см. примеры ниже)). Подробно понятия точности и эффективности АП обсуждаются в седьмом разделе.

Рассмотрим влияние информированности агентов на состояние АС. Под состоянием АС будем понимать совокупность действий агентов или некоторый их агрегат (то есть вектор $y \in \hat{I} A'$, или результат совместной деятельности $z = w(y, x) \in \hat{I} A_0$, или в более общем случае – значение некоторого параметра $q = F(y, q)$), а под их рациональным поведением (см. выше) – выбор равновесных стратегий, причем параллельно будут анализироваться максиминное равновесие (в рамках которого каждый из игроков устраняет неопределенность относительно действий других игроков, рассчитывая на наилучшие с его точки зрения их стратегии) и равновесие Нэша.

Опишем сначала рассматриваемую в [24] модель *информационного регулирования*, при котором управляющий орган – центр – передает информацию управляемым субъектам (агентам) о значениях некоторых параметров, например, прогнозируемых значениях факторов, влияющих на функционирование системы (например, о состоянии внешней среды). В *модели регулируемого равновесия* (следует отметить, что термин «регулируемое равновесие» имеет гораздо более широкую область применения, нежели чем только информационное регулирование, так как, фактически, он охватывает все теоретико-игровые модели управления многоэлементными АС [70]) задача центра состоит в том, чтобы привести систему в наиболее выгодную для него ситуацию равновесия (предполагается, что при каждом заданном сообщении центра агенты достигают некоторого равновесия).

¹⁹ Понятно, что АП является управлением только для активных систем – в пассивных системах он бессмысленен и всегда будет являться пассивным прогнозом (см. второй раздел).

Рассмотрим систему с n агентами, каждому из которых центр сообщает информацию u_i о неопределенном параметре $q \in Q$, и это сообщение агент воспринимает как истинное значение. *Однородной* в [24] названа стратегия центра, заключающаяся в сообщении одинаковой информации q' всем агентам. Определим три типа (каждый последующий включает предыдущие как частные случаи) передаваемой агентам информации:

1) центр сообщает q точно, то есть стратегия однородна и $u_i = q, i \in N = \{1, 2, \dots, n\}$;

2) центр использует только однородные стратегии, но $q'(q)$ может отличаться от q ;

3) центр может использовать произвольные (неоднородные) стратегии $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$.

Обозначим $y_i \in A_i$ – действие i -го агента, A_i – множество его допустимых действий, $y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in A' = \prod_{i \in N} A_i$ – вектор

действий всех агентов. Функция полезности (функция выигрыша, целевая функция) i -го агента $v_i(y)$ зависит от действий всех агентов $y \in A'$ и неопределенного параметра $q \in Q$.

После сообщения информации центром в рамках предположения Π_1 i -ый агент считает, что агенты имеют целевые функции $f_{ij}(y) = v_j(y, u_i), j, i \in N$. Поэтому, если каждый агент применяет равновесную по Нэшу (с точки зрения имеющейся у него информации) стратегию $y_i^*(u_i)$, определяемую равновесным вектором $y^*(u_i)$:

$$" j \in N, " y_j \in A_j f_{ij}(y_j^*(u_i), y_{-j}^*(u_i)) \geq f_{ij}(y_j, y_{-j}^*(u_i)),$$

где $y_{-j} = (y_1, y_2, \dots, y_{j-1}, y_{j+1}, \dots, y_n) \in A_{-j} = \prod_{i \neq j} A_i$ – обстановка игры

для j -го агента, то в результате сложится следующая «равновесная» (в информационном смысле) ситуация:

$$y^*(u) = (y_1^*(u_1), y_2^*(u_2), \dots, y_n^*(u_n)),$$

которая в [24] названа *регулируемым равновесием*. Так как в моделях управления многоэлементными организационными системами любое равновесие игры агентов зависит от стратегии центра (то есть является регулируемым равновесием), то для обозначения совокупности равновесных при заданной информированности

игроков стратегий будем использовать термин «**информационное равновесие**».

В частном случае однородных (достоверных или недостоверных) сообщений центра q' равновесная в информационном смысле ситуация $y^*(q') = (y_1^*(q'), y_2^*(q'), \dots, y_n^*(q'))$ будет равновесной и в «классическом» смысле, так как представления каждого агента о целевой функции любого другого агента будут совпадать с представлениями последнего о своей целевой функции.

Если целевая функция центра имеет вид $F(y, q)$, то задача управления будет заключаться в поиске такого вектора сообщений $u^*(q)$ агентам, который бы побуждал их прийти в наиболее выгодное для центра равновесие (если множество $R(u)$ равновесий содержит более одного элемента, то центр может рассчитывать на гарантированный результат): $u^*(q) = \max_{u \in \Theta^n} \min_{y^*(u) \in R(u)} F(y^*(u), q)$.

В [24] сформулированная задача исследуется для частного вида целевых функций центра и агентов.

Обобщим рассмотренную концепцию регулируемого равновесия на случай модели принятия решений, используемой в настоящей работе. В ходе дальнейшего изложения будем различать субъективное описание игры (то есть, описание с точки зрения игрока (агента)) и объективное (то есть, описание с точки зрения центра, которому известно множество $Q_0 \subseteq Q$). Если каждому из игроков известно множество Q_i , то есть $I_i = Q_i, i \in \hat{I} N$ (иными словами, выполнено предположение Π_1 – см. предыдущий раздел), то *субъективной гарантирующей стратегией* i -го игрока будет

$$(1) y_i^2(I_i) = \arg \max_{y_i \in A_i} \min_{q \in \Theta_i} \min_{y_{-i} \in A_{-i}} f_i(y_i, y_{-i}, q), i \in \hat{I} N,$$

где $y_{-i} = (y_1, y_2, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_n) \in \prod_{j \neq i} A_j$ – обстановка игры

для i -го игрока. Субъективный гарантированный выигрыш равен

$$(2) f_i^2(I_i) = \min_{q \in \Theta_i} f_i(y_i^2(I_i), y_{-i}^2(I_i), q), i \in \hat{I} N,$$

а объективный гарантированный выигрыш равен

$$f_i^2(I, I_0) = \min_{q \in \Theta_0} f_i(y_i^2(I), y_{-i}^2(I_i), q), i \in \hat{I} N,$$

где $I = (I_1, I_2, \dots, I_n)$ – вектор информированностей игроков.

Аналогично можно записать *субъективное равновесие Нэша* $y^*(I_i) = (y_1^*(I_i), y_2^*(I_i), \dots, y_n^*(I_i)) \hat{I} A'$ (устраняя неопределенность относительно состояния природы вычислением гарантированного по q результата):

$$(3) \quad " i \hat{I} N, " y_i \hat{I} A_i \min_{q \in \Theta_i} f_i(y_i^*, y_{-i}^*, q) \stackrel{\exists}{=} \min_{q \in \Theta_i} f_i(y_i, y_{-i}, q).$$

Субъективный гарантированный выигрыш при этом равен

$$(4) \quad f_i^*(I_i) = \min_{q \in \Theta_i} f_i(y_i^*(I_i), y_{-i}^*(I_i), q), i \hat{I} N,$$

а объективный гарантированный выигрыш равен

$$f_i^*(I, I_0) = \min_{q \in \Theta_0} f_i(y_i^*(I_i), y_{-i}^*(I_{-i}), q), i \hat{I} N.$$

Изменяя информацию I , центр может изменять выбираемые агентами равновесные стратегии (1) и/или (3), совокупность которых обозначим $R(I)$, что и составляет суть информационного управления.

Пусть теперь, помимо информации о множестве Q_i возможных значений неопределенного параметра, каждый агент имеет *представления* (термин «представления», быть может, является не совсем удачным, так как используется в психологии несколько в другом смысле, однако достаточно точно отражает суть понятия информированности агентов друг о друге (см. также модели многоагентных систем [70, 98, 120])) об информированности других агентов²⁰. Так, агент i может предполагать, что информированность j -го агента есть $Q_{ij} \hat{I} Q$ (иными словами, выполнено предположение Π_2 – см. предыдущий раздел). Моделируя поведение других игроков, каждый агент вычисляет информационное равновесие $R(I_i)$ на основании имеющейся у него информации. В этом случае $I_i = (Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{i,i-1}, Q_{i,i}, Q_{i,i+1}, \dots, Q_{in}), i \hat{I} N$. Запишем по

²⁰ Как отмечалось в предыдущем разделе, обобщением данной модели является модель, в которой каждый агент имеет определенные представления о представлениях о нем других агентов и т.д. – см. предположения Π_m , $m > 2$, выше. Увеличение глубины рефлексии и исследование соответствующих моделей коллективного поведения субъектов с рефлексией и управления ими представляется перспективным направлением будущих исследований (см. также примеры в девятом разделе настоящей работы).

аналогии с (1)-(4) для рассматриваемого случая субъективные максиминное равновесие и равновесие Нэша:

$$(5) y_{ij}^2(I_i) = \arg \max_{y_j \in A_j} \min_{q \in \Theta_{ij}} \min_{y_{-j} \in A_{-j}} f_j(y_j, y_{-j}, q), i, j \in \hat{I} N, j \neq i,$$

$$(6) y_i^2(I_i) = y_{ii}^2(I_i) = \arg \max_{y_i \in A_i} \min_{q \in \Theta_i} f_i(y_{i1}^2(I_i), y_{i2}^2(I_i), \dots, y_i, \dots, y_{in}^2(I_i), q), i \in \hat{I} N,$$

$$(7) f_i^2(I_i) = \min_{q \in \Theta_i} f_i(y_i^2(I_i), y_{i,-i}^2(I_i), q), i \in \hat{I} N,$$

$$(8) " i, j \in \hat{I} N, j \neq i, " y_j \in \hat{I} A_j \min_{q \in \Theta_{ij}} f_j(y_{ij}^*, y_{i,-j}^*, q) \cong \min_{q \in \Theta_{ij}} f_j(y_j, y_{i,-j}, q),$$

$$(9) y_i^*(I_i) = y_{ii}^*(I_i) = \arg \max_{y_i \in A_i} \min_{q \in \Theta_i} f_i(y_{i1}^*(I_i), y_{i2}^*(I_i), \dots, y_i, \dots, y_{in}^*(I_i), q), i \in \hat{I} N,$$

$$(10) f_i^*(I_i) = \min_{q \in \Theta_i} f_i(y_{ii}^*(I_i), y_{i,-i}^*(I_i), q), i \in \hat{I} N.$$

Если " $i, j \in \hat{I} N$ $Q_{ij} = Q_j$ ", то Π_2 переходит в Π_1 . При этом выражения (5)-(10) переходят в соответствующие выражения (1)-(4).

Задача информационного управления в общем виде может быть записана как:

$$\min_{q \in \Theta_0} \min_{y \in R(I)} F(y, q) \text{ @ } \max_I,$$

где I – информационное управление (вектор сообщаемой центром агентам информации), $F(\cdot)$ – функция полезности центра (его целевой функцией является $f_0(I) = \min_{q \in \Theta_0} \min_{y \in R(I)} F(y, q)$ – см. разде-

лы 2 и 3), $R(I)$ – информационное равновесие (множество равновесных по Нэшу при данном информационном управлении стратегий агентов), $Q_0 \hat{I} Q$ – известное центру множество возможных значений неопределенных параметров.

В рамках рассматриваемой модели информационное управление со стороны центра (его сообщения агентам) может затрагивать:

- множества Q_i – информационное регулирование;
- множества Q_{ij} – рефлексивное управление;

- равновесные состояния системы $R(I)$, или в общем случае некоторые параметры Q , зависящие от равновесных состояний системы и состояния природы – активный прогноз.

Примеры выделенных типов информационного управления рассматриваются в девятом разделе.

6. ЗАДАЧА АКТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Если в задачах информационного регулирования и рефлексивного управления центр сообщает агенту некий "факт" (информацию о некотором параметре, представлениях других агентов или их действиях), то в задаче активного прогнозирования сообщается прогноз $q \hat{I} A_q$ (или $Q \hat{I} A_q$) – например, равновесный результат деятельности агентов. Центр как бы сообщает агенту: если ты будешь действовать наилучшим для себя образом, то результат будет таким, как я прогнозирую (в этом смысле прогнозом, сообщаемым агенту, может быть и его (агента) собственное действие, что при сообщении факта не может иметь место). Далее агент на основании информации о будущих значениях векторов y^2 или y^* может «восстанавливать» информацию $\{Q; \hat{I} Q\}$ о состоянии природы $q \hat{I} Q$ и использовать ее при вычислении равновесных стратегий (в частности, собственной стратегии).

Перейдем к формальному определению понятий информационного регулирования и активного прогноза, считая, что центр использует однородную стратегию, то есть всем агентам сообщается один и тот же прогноз $Q \hat{I} A_q$ (множество возможных значений параметра q), или одно и то же множество Q_0 возможных значений состояния природы.

Обозначим $E_N(q) \hat{I} A'$ – множество равновесий Нэша игры агентов при состоянии природы $q \hat{I} Q$ (при определении равновесия Нэша – см. предыдущий раздел – считается, что каждый агент стремится максимизировать гарантированное (по q) значение своей целевой функции). Далее, обозначим: $E_N(Q_0) = \bigcup_{q \in \Theta_0} E_N(q)$ –

множество векторов действий агентов, которые могут быть равновесными по Нэшу при $q \hat{I} Q_0$, $A_0(Q_0) = \{z \hat{I} A_0 \mid z = w(y, q),$

$y \hat{I} E_N(q), q \hat{I} Q_0$ – множество равновесных результатов деятельности, которые могут реализоваться при $q \hat{I} Q_0$.

Тогда задача информационного регулирования в рамках принципа доверия может быть записана в следующем виде (см. рисунок 5):

$$(1) \min_{z \in A_0(\theta_0)} n_0(z) \text{ @ } \max_{\theta_0 \subseteq \Theta} .$$

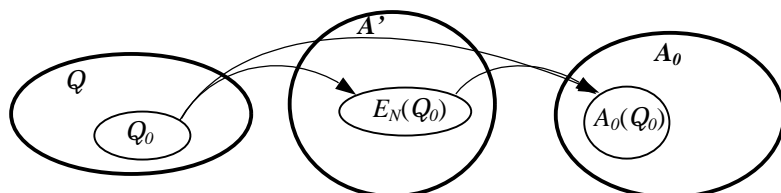


Рис. 5. Структура задачи информационного регулирования

Таким образом, в рамках информационного регулирования центр определяет какие действия и результаты деятельности могут оказаться равновесными при тех или иных значениях состояния природы, а затем выбирает сообщение, максимизирующее гарантированное значение своего критерия эффективности – см. (1).

В задаче активного прогнозирования ситуация более сложная. При получении от центра прогноза $Q \hat{I} A_q$ множества возможных значений некоторого параметра (например, подмножества множества возможных результатов деятельности – при этом $q = z$, $F(x) = w(x)$, $A_q = A_0$) – каждый агент вычисляет пару множеств – множество равновесных по Нэшу действий $A'(Q) = \{y \hat{I} A' / F(y, q) \hat{I} Q, y \hat{I} E_N(q), q \hat{I} Q(Q)\}$, приводящих к реализации сообщенных значений q , и соответствующее ему множество возможных значений состояния природы: $Q(Q) = \{q \hat{I} Q / F(y, q) \hat{I} Q, y \hat{I} E_N(q)\}$.

Во введенных обозначениях дальнейший ход мыслей агента описывается следующим образом (см. рисунок 6): он вычисляет множество значений неопределенного параметра $Q(Q)$, при которых равновесными являются действия из множества $A'(Q)$, а затем использует это множество $Q(Q)$ для определения своей равновесной стратегии, то есть "проходит" сначала от Q к Q (см. рисунок 6), а затем (как в задаче информационного регулирования – см.

рисунок 5) – от Q к результатам деятельности, на множестве $A_0(Q(Q))$ которых определена его функция полезности.

Таким образом, задача активного прогнозирования может быть записана в следующем виде (см. рисунок 6):

$$(2) \quad \min_{z \in A_0(\theta(Q))} p_0(z) \text{ @ } \max_{Q \subseteq A_q}$$

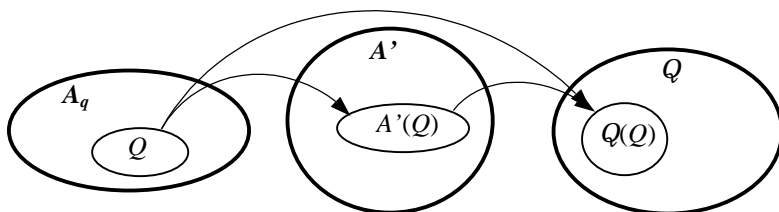


Рис. 6. Структура задачи активного прогнозирования

Из сравнений задач (1) и (2) видно, что при $A_q = A_0$ **эффективность информационного регулирования не ниже эффективности активного прогноза**. Равенство достигается, в частности, когда $A_0(q)$ и $Q(q)$ – однозначные отображения (см. примеры в девятом разделе). При этом " $z \hat{I} A_0$ ", " $q \hat{I} Q$ " $A_0(Q(z)) \circ z$, $Q(A_0(q)) \circ q$. В то же время, активный прогноз является более «мягким» и опосредованным воздействием на управляемую систему, нежели чем информационное регулирование, так как последнее требует значительно большей информированности центра (см. примеры в девятом разделе).

Если центр использует неоднородную стратегию, то он сообщает разным агентам, вообще говоря, различный прогноз²¹. При этом в качестве сообщения может выступать вектор $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\} \subseteq A_q^n$, то есть i -му агенту сообщается прогноз $Q_i, i \hat{I} N$. Тогда каждый из агентов вычисляет свое множество возможных значений неопределенного параметра $Q(Q_i)$ и вырабатывает исходя из него свою стратегию (ср. с предположением Π_1 в разделе 4).

²¹ Понятно, что в этом случае по крайней мере один агент обманется в своих ожиданиях, то есть для него прогноз окажется неточным – см. следующий раздел.

Возможно, вообще говоря, активное прогнозирование более сложной структуры: сообщение i -му агенту прогноза, а также представления других агентов (ср. с предположением Π_2 в разделе 4) – набора множеств $\{Q_{ij}\}$. В этом случае i -й агент поступает следующим образом. Он вычисляет за каждого из остальных агентов множества $Q_{ij} = Q(Q_{ij})$, $j \neq i$, и на основании этих множеств определяет предполагаемые действия y_{ij} , $j \neq i$. Далее, вычисляя «свое» множество $Q_i = Q(Q_{ii})$ и подставляя в свою целевую функцию действия других агентов, i -й агент определяет свое действие y_i (см. формулы (5), (6) или (8), (9) раздела 5).

Отметим, что в соответствии с принципом достаточной рефлексии (см. раздел 4) i -й агент рассматривает множества $\{Q_{ij}\}$ лишь в том случае, если у него есть для этого основания. Таким основанием является, например, сообщение центром набора множеств $\{Q_{ij}\}$. Однако возможны ситуации, когда и в случае сообщения множества Q_i агент может заключить, что необходимо перейти к рассмотрению набора множеств $\{Q_{ij}\}$. Пусть, например, i -й агент считает, что возможным множеством значений неопределенного неизвестного параметра является $Q' \hat{I} Q$. Пусть, далее, $A_q = A_0$ и не существует такого $q \hat{I} Q'$, которому в равновесном состоянии $y^*(q) \hat{I} E_N(q)$ соответствовало бы какое-либо значение $F(y^*(q), q) \hat{I} Q_i$. Если справедлив принцип доверия (см. раздел 4) и, следовательно, агент не подвергает сомнению истинность сообщения центра, то у него остаются два выхода: подвергнуть сомнению свою информированность (множество Q') либо информированность других агентов (то есть ввести в рассмотрение множества Q_{ij}). Этот вопрос заслуживает отдельного исследования и в настоящей работе не рассматривается.

Итак, в настоящем разделе мы сформулировали задачу активного прогнозирования. Обсудим, что следует понимать под точностью активного прогноза и его эффективностью как средства управления.

7. ТОЧНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ АКТИВНОГО ПРОГНОЗА

Рассмотрим сначала, что понимается под точностью пассивного прогноза. Предположим, что имеется некоторая система, относительно будущих состояний которой делается прогноз. Этот прогноз производится на основе той или иной модели системы (модели прогнозируемого объекта), и вычисляемая апостериори разность

$$||\text{прогноз} - \text{факт}||,$$

где $||\cdot||$ отражает используемое «расстояние» между состояниями системы, может трактоваться и как *точность пассивного прогноза*, и как критерий адекватности используемой при прогнозе модели моделируемой системе.

Если система является пассивной (не содержит активных элементов, которые могут изменять свое поведение при получении новой информации), или если прогноз не становится известным участникам активной системы, то любой прогноз будет пассивным.

В случае, когда имеет место активный прогноз, использовать для определения его точности приведенную выше разность невозможно, так как невозможно оценить «фактическое» («чистое» – каким оно было бы без информационного воздействия) состояние системы и сравнить его с прогнозным.

Далее в этом разделе мы рассмотрим на качественном уровне характерные для АП величины и их комбинации. Для большей наглядности будем считать, что центр сообщает в качестве прогноза результат деятельности.

Введем следующие обозначения: z_1 – фактическое состояние системы в случае, если прогнозирование не осуществляется (вообще говоря, представления о z_1 у центра и агента могут различаться – мы будем обозначать представления центра z_1' , а представления агента z_1'')²²; z_2 – прогнозируемое состояние системы (становящееся достоянием гласности, то есть доводящееся до участников системы); z_3 – состояние системы в тот момент време-

²²Отметим, что разность $||z_1 - z_1'||$ характеризует точность пассивного прогноза, осуществляемого центром.

ни, относительно которого делался прогноз (то есть состояние, в котором она фактически окажется с учетом АП); z_0 – наиболее благоприятное с точки зрения центра состояние системы.

Для четырех введенных характеристик возможны шесть различных их попарных разностей, перечисленных в таблице 1. Каждая из этих разностей может оцениваться тремя субъектами – субъектом, осуществляющим прогноз (центром), участниками системы (активными элементами (АЭ)), и сторонним наблюдателем (СН) – в два различных момента времени – до и после осуществления АП, то есть до сообщения АЭ прогноза и после реализации конечного состояния системы.

Таким образом, имеем 36 возможных комбинаций, рассмотренных в таблице 1. Не все эти комбинации имеют смысл (соответствующие ситуации обозначены прочерком: «–»). Кроме того, ячейки таблицы 1 содержат ссылки на приводимый ниже список предположений, в соответствии с которыми тот или иной критерий не имеет смысла с точки зрения определенного субъекта.

Перечислим основные свойства АП и введенные при заполнении таблицы 1 предположения:

1. АП является управлением;
2. Конечное состояние системы z_3 априори неизвестно;
3. Сторонний наблюдатель не обладает собственными интересами и моделью системы²³ (то есть не имеет возможность определить z_1);
4. Цели центра неизвестны АЭ.

Оценки критериев, соответствующие ячейкам таблицы 1, не содержащим прочерков, имеют следующие содержательные интерпретации (отметим, что в силу различного их восприятия субъектами одни и те же величины могут иметь различные интерпретации).

Разность $||z_1'' - z_2||$, оцениваемая центром до сообщения АП, характеризует возможность сообщения АЭ прогноза z_2 с учетом того, что АЭ может не поверить сообщению.

²³ Другими словами, центр наблюдает или знает (в соответствующие моменты времени) $z_0, z_1', z_1'', z_2, z_3$, АЭ наблюдает или знает (в соответствующие моменты времени) z_1'', z_2, z_3 , сторонний наблюдатель наблюдает (в соответствующие моменты времени) z_2 и z_3 .

Табл. 1. Критерии оценки АП

№	Критерий	Центр		СН		АЭ	
		до АП	после АП	до АП	после АП	до АП	после АП
1.	$\ z_1 - z_2\ $	«можно ли делать такое сообщение, поверит ли ему АЭ»	- 1	- 3	- 3	«различие моделей, используемых центром и АЭ»	- 1
2.	$\ z_1 - z_3\ $	- 2	«возможности управления»	- 3	- 3	- 2	«вмешательство центра»
3.	$\ z_2 - z_3\ $	- 2	- 1	- 2	точность АП	- 2	«правдивость и/или компетентность центра»
4.	$\ z_1 - z_0\ $	«повод для управления – что будет, если не управлять»	- 1	- 3	- 3	- 4	- 4
5.	$\ z_2 - z_0\ $	- 1	- 1	- 3	- 3	- 4	- 4
6.	$\ z_3 - z_0\ $	- 2	эффективность АП	- 3	- 3	- 4	- 4

Разность $||z_1'' - z_2||$, оцениваемая АЭ в момент получения АП, но до реализации z_3 , с его точки зрения характеризует *степень различия моделей*, используемых им и центром для прогноза конечного состояния системы.

Разность $||z_1' - z_3||$, оцениваемая центром после реализации z_3 , с его точки зрения характеризует *возможности активного прогноза как средства информационного управления*, то есть возможности влияния на конечное состояние системы за счет целенаправленного сообщения прогнозной информации.

Разность $||z_1'' - z_3||$, оцениваемая АЭ после реализации z_3 , с его точки зрения характеризует вмешательство (влияние) центра, то есть отражает разность между состояниями в отсутствии и в присутствии АП.

Разность $||z_2 - z_3||$, оцениваемая СН после реализации z_3 , с его точки зрения характеризует разность между спрогнозированным центром и фактически реализовавшимся состояниями системы, то есть характеризует **точность АП**. Таким образом, точности активного и пассивного прогноза с точки зрения стороннего наблюдателя определяются одинаково.

Разность $||z_2 - z_3||$, оцениваемая АЭ после реализации z_3 , с его точки зрения характеризует *правдивость центра*, то есть степень различия между тем состоянием системы, которое спрогнозировал центр, и тем состоянием, которое фактически реализовалось.

Разность $||z_1' - z_0||$, оцениваемая центром до реализации z_3 , с его точки зрения характеризует степень соответствия состояния системы в отсутствие управления целям центра, то есть позволяет ответить на вопрос «что произойдет в отсутствие управления».

Разность $||z_3 - z_0||$, оцениваемая центром после реализации z_3 , с его точки зрения характеризует степень соответствия состояния системы в присутствии управления целям центра, то есть **эффективность АП** как управления (например, эффективность АП может характеризоваться разностью $|f_0(z_3) - f_0(z_0)|$, где $f_0(z)$ – целевая функция центра).

Остальные комбинации не имеют смысла в силу указанных выше причин (см. таблицу 1).

В заключение данного раздела отметим следующее. Для активного прогноза фактическое состояние системы z_3 зависит неким образом от самого прогноза z_2 . Обозначим эту зависимость $\zeta(\cdot)$, то

есть $z_3 = \zeta(z_2)$. Тогда точность активного прогноза z характеризуется разностью $\|z - \zeta(z)\|$.

Точность активного прогноза тесно связана с таким обсуждаемым в следующем разделе свойством информационного управления как его стабильность.

8. ПРОБЛЕМА СТАБИЛЬНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

При осуществлении информационного управления, естественно, возникает следующая проблема. Если центр сообщает агенту некоторую информацию, на основании которой последний принимает решение, то это решение является для агента в каком-либо смысле наилучшим, то есть приводящим к наиболее желательному результату. Если, далее, после реализации решения результат оказывается достаточно далек от ожидаемого агентом, то доверие к сообщениям центра окажется сильно поколебленным, или даже потерянным, что весьма затруднит центру осуществление информационного управления в дальнейшем. Таким образом, в этом случае управление оказывается нестабильным – возможность его применения на протяжении длительного времени весьма проблематична.

Исходя из этого соображения, представляется целесообразным выделить в особый класс управляющих воздействий *стабильное* информационное управление, при осуществлении которого агент получает именно тот результат, которого ожидает. Требование стабильности, вообще говоря, сужает возможности центра, побуждает его «более внимательно» относиться к своим сообщениям.

Одним из примеров стабильного информационного управления является рассмотренный выше точный активный прогноз (см. предыдущий раздел), при котором реально получившееся состояние системы совпадает с прогнозируемым. В более общем случае агент может на основании наблюдения результата своей деятельности уточнить информацию о неизвестных параметрах и сопоставить ее с сообщением центра. Управление, следовательно, является

стабильным, если уточненная информация не противоречит сообщению центра.

Рассмотрим ситуацию, в которой участвуют центр с целевой функцией $f_0(y, q)$ и агент с целевой функцией $f(y, q)$, y – действие агента, q – значение неизвестного параметра. Введем следующие обозначения: q' – представление агента до сообщения центра; \tilde{q} – сообщение центра; $y^*(q)$ – действие агента, максимизирующее его целевую функцию при известном q (будем для простоты считать, что для каждого q такое действие существует и единственно):

$$(1) y^*(q) = \arg \max_{y \in A} f(y, q).$$

Запишем, далее, следующие величины:

$n_1 = f(y^*(q'), q')$ – выигрыш, на который агент рассчитывал до сообщения центра;

$n_2 = f(y^*(\tilde{q}), \tilde{q})$ – выигрыш, на который агент рассчитывал после сообщения центра;

$n_3 = f(y^*(q'), \tilde{q})$ – выигрыш, который агент получил бы, с его точки зрения (после сообщения центра но до получения выигрыша), в отсутствие сообщения центра;

$n_4 = f(y^*(\tilde{q}), q)$ – выигрыш, который агент фактически получил;

$n_5 = f(y^*(q'), q)$ – выигрыш, который агент объективно получил бы в отсутствие сообщения центра;

$n_6 = f(y^*(q), q)$ – выигрыш, который агент получил бы в случае сообщения центром истинного значения неизвестного параметра.

По аналогии с неманипулируемым и согласованным мотивационным управлением [13, 15, 68] будем называть информационное управление **стабильным**, если $n_2 = n_4$, то есть агент получил такой выигрыш, на какой и рассчитывал (в этом случае у агента нет повода сомневаться в том, что $q = \tilde{q}$). Будем называть информационное управление **согласованным**, если $n_4 \geq n_5$, то есть выигрыш агента в присутствии информационного управления не меньше, чем выигрыш в его отсутствие.

В силу определения функции $y^*(q)$, для величин n_1 – n_6 выполняются следующие соотношения²⁴:

(2) $n_1 \geq n_3$; $n_1 \geq n_5$; $n_2 \geq n_3$; $n_2 \geq n_4$; $n_6 \geq n_4$; $n_6 \geq n_5$.

Отметим, что истинные значения n_5 и n_6 могут остаться неизвестными для агента. В случае стабильного информационного управления с точки зрения агента имеют место равенства $q = \tilde{q}$, $n_5 = n_3$, $n_6 = n_4 = n_2$. Из этих равенств следует, с учетом соотношений (2), что $n_4 = n_2 \geq n_3 = n_5$. Поэтому **стабильное информационное управление всегда является субъективно (то есть с точки зрения агента) согласованным**.

Приведенные выше рассуждения допускают обобщение на случай многоэлементной системы. В этом случае под y^* следует понимать вектор действий агентов, соответствующий информационному равновесию (см. раздел 5). При этом для каждого агента будут «свои» значения величин n_1 – n_6 .

В случае многоэлементной системы соотношения, аналогичные (2), вообще говоря, не выполняются. Например, выигрыш агента в случае сообщения центром истинного значения неизвестного параметра q может быть меньше, чем в случае сообщения некоторого другого значения \tilde{q} . Более того, возможны ситуации, когда сообщение некоторого $\tilde{q} \neq q$ может для всех агентов привести к лучшему результату, чем при сообщении q (см. девятый раздел).

Вернемся к обсуждению ситуации с одним агентом. Нетрудно видеть, что условие стабильности $n_2 = n_4$ всегда выполняется при $\tilde{q} = q$, то есть при сообщении центром истинного значения q . Выполнение условия стабильности при $\tilde{q} \neq q$ является, по видимому, редким исключением. Поэтому введем для центра возможность влиять на информацию о результате деятельности, получаемую агентом.

На рисунке 7 приведена структура управления агентом в несколько видоизмененном по сравнению с разделом 2 виде (ср. с

²⁴ Отметим, что в соответствии с [108], выполнение $n_2 = n_4$ может интерпретироваться как "порядочность", $n_2 \geq n_1$ – как "проявление заботы", $n_4 \geq n_1$ – как "результативность".

рисунком 1). Как было отмечено выше, наблюдение результата деятельности z позволяет уточнить представления о неопределенном параметре q , что обозначено на рисунке 7 через $I(z)$.

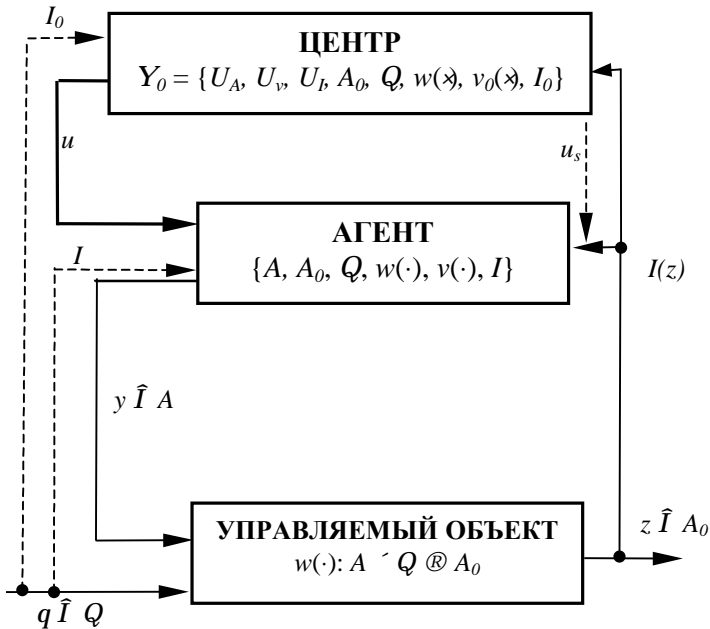


Рис. 7. Стабилизация информационного управления

Предположим, что центр имеет возможность влиять на апостериорную информацию $I(z)$, получаемую агентом (на рисунке 7 это влияние обозначено символом u_s и пунктирной стрелкой). Тогда центр может реализовать это влияние, например, перераспределив выигрыши таким образом, чтобы агент получил тот выигрыш, на который рассчитывает. Такое воздействие центра назовем **стабилизацией** информационного управления.

Стабилизация информационного управления предполагает изменение целевых функций. Рассмотрим это изменение подробнее, по-прежнему оставаясь в рамках модели с центром и одним агентом.

Пусть центр с целевой функцией $f_0(y, q)$ сообщает агенту с целевой функцией $f(y, q)$ значение неизвестного параметра \tilde{q} , после чего агент выбирает соответствующее действие (см. (1)). Тогда целевые функции центра и агента после перераспределения выигрышей имеют следующий вид:

$$\tilde{f}_0(\tilde{q}) = f_0(y^*(\tilde{q}), q) - (f(y^*(\tilde{q}), \tilde{q}) - f(y^*(\tilde{q}), q)), \quad \tilde{f}(\tilde{q}) = f(y^*(\tilde{q}), \tilde{q}).$$

Мы считаем, что целевые функции зависят только от сообщения центра \tilde{q} , поскольку q является параметром, а $y^*(\tilde{q})$ определяется выражением (1).

Такое изменение целевых функций можно интерпретировать двумя способами. Согласно первой центр скрывает от агента истинное положение вещей. Вторая интерпретация состоит в том, что центр, делая сообщение, как бы берет на себя некие обязательства относительно выигрыша агента. При этом стабилизация является выполнением этих обязательств, и информационное управление сближается с мотивационным.

Пример стабилизации информационного управления в модели с одним агентом приведен в разделе 9.1.

В случае многих агентов стабилизация также может заключаться в перераспределении выигрыша между центром и/или некоторыми (или же всеми) агентами.

Пусть центр с целевой функцией $f_0(y, q)$ (здесь y – вектор действий агентов) сообщает агентам с целевыми функциями $f_i(y, q)$, $i = 1, 2, \dots, n$, значение неизвестного параметра \tilde{q} . При этом агенты выбирают вектор действий $y^*(\tilde{q})$, реализующий информационное равновесие (см. раздел 5). Тогда целевые функции центра и агентов после перераспределения выигрышей имеют следующий вид:

$$\tilde{f}_0(\tilde{q}) = f_0(y^*(\tilde{q}), q) - \sum_{i=1}^n (f_i(y^*(\tilde{q}), \tilde{q}) - f_i(y^*(\tilde{q}), q)), \quad \tilde{f}_i(\tilde{q}) = f_i(y^*(\tilde{q}), \tilde{q})$$

(и здесь считаем, что целевые функции зависят только от сообщения центра \tilde{q}).

Требование стабильности информационного управления (даже с учетом допустимости стабилизирующего воздействия) в случае

одного агента не увеличивает эффективность управления. Действительно, легко видеть, что

$$\tilde{f}_0(\tilde{q}) \leq f_0(y^*(\tilde{q}), q),$$

поэтому

$$\max_q \tilde{f}_0(\tilde{q}) \leq \max_q f_0(y^*(\tilde{q}), q).$$

В случае многих агентов это, вообще говоря, не так: если допустить стабилизирующее воздействие центра, то его выигрыш может и увеличиться по сравнению с максимально возможным выигрышем при отсутствии как требования стабильности, так и возможности стабилизирующего воздействия.

В следующем разделе мы рассмотрим ряд примеров теоретико-игровых моделей информационного управления (информационного регулирования, рефлексивного управления, активного прогноза), обращая внимание на свойства стабильности, согласованности и допуская в некоторых случаях стабилизирующее воздействие центра.

9. ПРИМЕРЫ МОДЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

В настоящем разделе для ряда АС рассматриваются примеры моделей информационного регулирования, активного прогноза и рефлексивного управления, в том числе – модели взаимодействия производителя и посредника, совместного производства, конкуренции на рынке, распределения ресурса, аукциона и аккордной оплаты труда. Приводимые результаты не следует рассматривать как исчерпывающие – изложение ведется на уровне примеров, иллюстрирующих качественные эффекты, возникающие при использовании тех или иных видов информационного управления. В то же время, эти примеры позволяют выделить перспективные направления дальнейших исследований (формальных моделей информационного управления), которые обсуждаются в заключении.

9.1. ПРИМЕР 1 (ПРОИЗВОДИТЕЛЬ И ПОСРЕДНИК)

Рассмотрим ситуацию, в которой участвуют агент, являющийся производителем некоторого вида продукции, и центр, являющийся посредником. Они взаимодействуют следующим образом:

1) оговариваются доли I и $(1 - I)$, в соответствии с которыми доход делится между производителем и посредником соответственно, $I \hat{I} (0; 1)$;

2) посредник сообщает производителю оценку \tilde{q} рыночной цены q ;

3) производитель производит некоторый объем продукта $y \in \mathbb{R}_+$ и передает его посреднику;

4) посредник реализует его по рыночной цене и передает производителю оговоренную долю дохода $I q y$, а себе забирает $(1 - I) q y$.

Предполагается, что посредник в точности знает рыночную цену, а производитель, напротив, не обладает никакой априорной информацией о ней.

Производитель характеризуется функцией издержек $c(y)$, которая связывает объем продукции и затраты на его производство (будем считать, что ограничения на мощность отсутствуют, то есть может производиться любой объем продукции).

В описанной ситуации ключевую роль играют три параметра – доля I , цена q и объем продукции y . О доле участники договариваются заранее, цену сообщает посредник, объем продукции выбирает производитель.

Теперь рассмотрим вопрос о том, как будут вести себя участники ситуации после того, как они договорились о долях I и $(1 - I)$. Производитель, стремясь максимизировать свою прибыль, выбирает объем производства y^* в зависимости от своей функции издержек, причитающейся ему доли дохода и сообщаемой посредником рыночной цены. Предположим, что у производителя нет возможности проверить, насколько сообщение посредника соответствует действительности. В этом случае посредник может сообщить значение \tilde{q} , не совпадающее, вообще говоря, с истинным значением рыночной цены q . Выбор посредником сообщения

\tilde{q} можно трактовать как осуществление информационного управления.

Наконец, предположим, что посредник стремится проводить стабильное информационное управление, то есть обеспечивать производителю тот доход, который он ожидает получить исходя из значения \tilde{q} .

Замечание: если посредник сообщает не одно число – точное значение цены, а, например, возможный интервал изменения цены, и при этом агент руководствуется принципом максимизации гарантированного результата, то далее под \tilde{q} можно понимать левую границу этого интервала.

В рамках описанных выше предположений целевые функции посредника и производителя выглядят, соответственно, следующим образом:

$$f_0(y, \tilde{q}) = qy - \tilde{q}ly, \quad f(y, \tilde{q}) = \tilde{q}ly - c(y).$$

Подчеркнем, что эти целевые функции записаны с учетом стабилизации, то есть перераспределения доходов центром (в качестве центра здесь выступает посредник), с целью добиться стабильности управления (см. раздел 8).

Наложим на функцию издержек некоторые ограничения таким образом, чтобы прибыль производителя (равная разности дохода и издержек) принимала максимальное значение ровно в одной точке $y^* = y^*(\tilde{q}) > 0$. Для этого достаточно потребовать, чтобы она была дважды дифференцируемой, и выполнялись условия:

$$c(0) = c'(0) = 0, \quad c'(y) > 0, \quad c''(y) > 0 \quad \text{при } y > 0, \\ c'(y) \rightarrow \infty \quad \text{при } y \rightarrow \infty.$$

Потребуем также выполнения следующего свойства: функция $(y c'(y))'$ является непрерывной, возрастающей и стремится к бесконечности при $y \rightarrow \infty$.

При этих условиях справедливы следующие утверждения.

1) Выбирая оптимальное для себя значение \tilde{q} , посредник может обеспечить максимальное значение своей целевой функции независимо от значения l .

2) Существует $I^* = I^*(q)$ такое, что

- а) если $I = I^*$, то оптимальным для посредника является сообщение истинного значения цены (то есть $\tilde{q} = q$),
- б) если $I < I^*$ ($I > I^*$), то производитель получает большую (меньшую) прибыль по сравнению с той, которую он получил бы при $\tilde{q} = q$ (то есть в случае сообщения посредником истинного значения цены).

3) Для степенных функций издержек $c(y) = ky^a$ ($k > 0$, $a > 1$) и только для них вышеупомянутое значение I^* является константой (не зависит от цены q): $I^* = 1/a$.

Доказательство. Получив от посредника сообщение \tilde{q} , производитель максимизирует свою целевую функцию, выбирая объем производства $\tilde{y} = \arg \max_{y \in A} f(y, \tilde{q})$ из условия $c'(\tilde{y}) = \tilde{q} I$.

Подставим \tilde{y} в целевую функцию посредника и, с учетом соотношения $\frac{d\tilde{y}}{d\tilde{q}} = \frac{I}{c''(\tilde{y})}$, приравняем нулю ее производную. После преобразований получаем уравнение

$$(1) \quad c'(\tilde{y}) + \tilde{y} c''(\tilde{y}) = q.$$

У этого уравнения имеется единственное решение \tilde{y} (подчеркнем, что \tilde{y} зависит только от q), которому соответствует оптимальное для посредника сообщение

$$(2) \quad \tilde{q} = \frac{c'(\tilde{y})}{I}.$$

При этом функция полезности посредника

$$f_0(\tilde{y}, \tilde{q}) = \tilde{y} (q - c'(\tilde{y})),$$

очевидно, не зависит от I . Утверждение 1 доказано. Заметим, что при этом прибыль производителя также не зависит от I :

$$(3) \quad f(\tilde{y}, \tilde{q}) = \tilde{y} c'(\tilde{y}) - c(\tilde{y}).$$

Определим I^* следующим образом:

$$(4) \quad I^* = \frac{c'(\tilde{y})}{q}.$$

Сопоставляя (2) и (4), видим, что при $I = I^*$ оптимальным для посредника является сообщение $\tilde{q} = q$.

Пусть теперь $I < I^*$. Тогда для оптимального сообщения посредника имеем (из (2) и (4)):

$$(5) \quad \tilde{q} = \frac{I^*}{I} q > q.$$

Если посредник сообщил бы q , то производитель выбрал бы y^* из уравнения

$$(6) \quad c'(y^*) = q I$$

и получил бы прибыль

$$(7) \quad f(y^*, \tilde{q}) = y^* c'(y^*) - c(y^*).$$

Сопоставляя (2), (5) и (6) получаем (с учетом возрастания $c'(y)$), что $\tilde{y} > y^*$. Далее, нетрудно убедиться, что функция $y c'(y) - c(y)$ возрастает. Поэтому сравнение (3) и (7) показывает, что при сообщении q прибыль производителя меньше, чем при сообщении \tilde{q} .

Аналогично доказывается, что при $I > I^*$ имеет место обратное – прибыль производителя при сообщении q больше, чем при сообщении \tilde{q} . Утверждение 2 доказано.

Проверим, при каком условии на функцию издержек $c(y)$ правая часть (4) не зависит от q . Из (1) видно, что для этого необходимо совместное выполнение соотношений

$$\frac{c'(y)}{q} = k_1, \quad \frac{y c''(y)}{q} = 1 - k_1 \quad (k_1 - \text{константа}).$$

Деля второе из них на первое, получаем дифференциальное уравнение

$$(8) \quad y c''(y) - k_2 c'(y) = 0,$$

где $k_2 = (1 - k_1)/k_1$ – произвольная константа. Решая уравнение (8), получаем (с учетом условий на функцию $c(y)$): $c(y) = k y^a$, где $k > 0$, $a > 1$. Нетрудно убедиться (воспользовавшись соотношениями (1) и (4)), что при этом $I^* = 1/a$. Утверждение 3 доказано.

9.2. ПРИМЕР 2 (СОВМЕШНОЕ ПРОИЗВОДСТВО)

Рассмотрим многоэлементную детерминированную двухуровневую АС, состоящую из центра и n агентов. Стратегией каждого агента является выбор действия, стратегией центра – выбор сообщений агентам.

Обозначим $y_i \hat{I} A_i = \mathfrak{R}_+^1$ – действие i -го агента, $i \hat{I} N = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество агентов, $y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \hat{I} A' = \prod_{i \in N} A_i$ – вектор действий агентов, $y_{-i} = (y_1, y_2, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_n) \hat{I} A_{-i} = \prod_{j \neq i} A_j$ – обстановка игры для i -го агента.

Интересы и предпочтения участников АС – центра и агентов – выражены их целевыми функциями (точнее – в соответствии с терминологией второго раздела – функциями полезности). Целевая функция i -го агента $f_i(y, r_i)$ представляет собой разность между доходом $h_i(y)$ от совместной деятельности и затратами $c_i(y, r_i)$, где r_i – параметр эффективности (тип) агента, то есть $f_i(y, r_i) = h_i(y) - c_i(y, r_i)$, $i \hat{I} N$.

Выберем следующий вид функций дохода и затрат:

$$(1) h_i(y) = I_i q Y, i \hat{I} N,$$

$$(2) c_i(y, r_i) = \frac{y_i^2}{2(r_i \pm b_i \sum_{j \neq i} y_j)}, i \hat{I} N,$$

где $Y = \sum_{i \in N} y_i$, $\sum_{i \in N} I_i = 1$. Для случая, когда в знаменателе выраже-

ния (2) стоит знак « \leftarrow », предполагается, что $\sum_{j \neq i} y_j < \frac{r_i}{b_i}$.

Содержательно набор агентов может интерпретироваться как некоторая фирма, подразделения которой (агенты) производят однородную продукцию, реализуемую на рынке по цене q . Суммарный доход $q Y$ распределяется между агентами в соответствии с фиксированными долями $\{I_i\}$. Затраты агента возрастают по его действиям, а эффективность деятельности (знаменатель выражения (2)) определяется типом агента. Взаимодействие агентов модели-

руется зависимостью затрат (эффективности деятельности) каждого из них от действий всех (других) агентов. Знак «+» в знаменателе выражения (2) соответствует эффективному взаимодействию агентов (убыванию затрат на масштаб) – чем больше действия выбирают другие агенты, тем меньше затраты (выше эффективность деятельности) рассматриваемого агента, что на практике может соответствовать снижению удельных постоянных издержек, обмену опытом, технологиями и т.д. Знак «-» в знаменателе выражения (2) соответствует неэффективному взаимодействию агентов (возрастанию затрат на масштаб) – чем больше действия выбирают другие агенты, тем больше затраты (ниже эффективность деятельности) рассматриваемого агента, что на практике может соответствовать нехватке основных фондов, ограничениям на побочные показатели (например, загрязнение окружающей среды) и т.д. Коэффициенты $\{b_i \in 0\}$ отражают степень взаимозависимости агентов.

Пусть рыночная цена q известна всем участникам АС. Тогда, дифференцируя целевые функции агентов, приравнявая производные нулю и складывая получившиеся при этом выражения

$$y_i = I_i q (r_i \pm b_i \sum_{j \neq i} y_j), i \in N,$$

получим следующую зависимость суммарных действий от параметра q :

$$Y(q) = \frac{\sum_{i \in N} \frac{I_i q r_i}{1 \pm I_i q b_i}}{1 \pm \sum_{i \in N} \frac{I_i q b_i}{1 \pm I_i q b_i}}.$$

Пусть $n = 2$, $I_i = b_i = 1/2$, $i = 1, 2$, тогда суммарное действие и равновесные по Нэшу действия агентов равны, соответственно:

$$(3) Y(q) = 2 q R / (4 \pm q),$$

$$(4) y_i^*(q) = \frac{2q}{16 - q^2} (4 r_i \pm q r_i), i = 1, 2.$$

Зависимости суммарного действия $Y(q)$ от цены q приведены на рисунках 8 и 9 соответственно (знак «+» или «-» соответствуют знаку в знаменателе выражения (2)). В случае «-» предполагается, что $q < 4$ (в противном случае равновесия Нэша не существует).

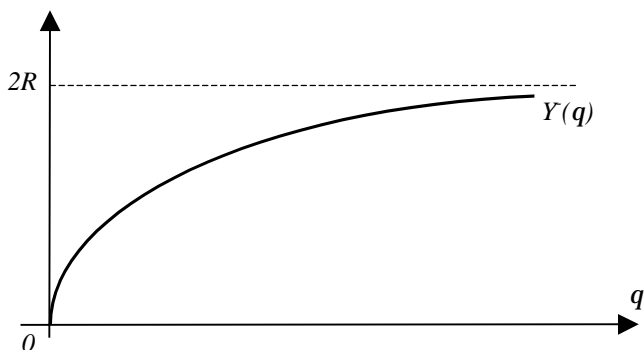


Рис. 8. Зависимость суммарного действия от цены

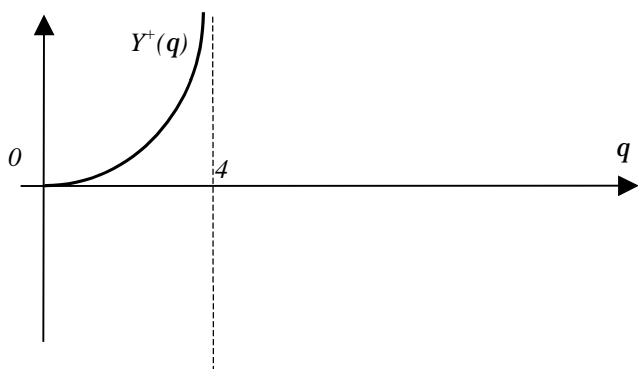


Рис. 9. Зависимость суммарного действия от цены

Из выражения (3) можно выразить зависимость параметра q от суммарных действий Y :

$$(5) \quad q = \frac{4Y}{2R \pm Y}.$$

Введем в моделируемой системе управление. Примем следующий порядок функционирования АС. Центру и агентам на момент принятия решения о выбираемых стратегиях (соответственно – управлении и действиях) известны целевые функции и

допустимые множества всех участников АС. Центр, обладая правом первого хода, выбирает значения управляющих переменных и сообщает их агентам, после чего агенты при известном управлении принимают решения о выбираемых действиях.

Институциональному управлению соответствует, например, введение центром квот – ограничений на максимальные значения действий, за нарушение которых на агентов могут быть наложены значительные штрафы.

Мотивационному управлению соответствует изменение параметров $\{I_i\}$, которые могут интерпретироваться как внутренние (внутрифирменные, трансфертные и т.д.) цены. Примеры подобного управления приведены в [13, 65, 68] как для задач планирования (когда центр назначает цены на основании сообщений агентов о неизвестных ему эффективности их деятельности), так и для задач стимулирования (когда доход агента рассматривается как вознаграждение, получаемое от центра).

Информационному управлению соответствует целенаправленное изменение центром информации, используемой агентами при принятии решений. Рассмотрим его более подробно.

Величины (3)-(5) могут быть вычислены и центром, и агентами на основании имеющейся у них априори информации. При этом оценка состояния природы – рыночная цена q – входит в них параметрически, следовательно, в зависимости от информированности участника АС, вычисляемые им значения параметров (3)-(5) могут различаться.

Пусть рыночная цена неизвестна агентам или известна неточно. Информационное регулирование в рассматриваемой модели заключается в сообщении центром агентам оценки $q_0 \hat{I} Q$ состояния природы (то есть центр использует однородную стратегию). В силу принципа доверия (который, как отмечалось выше, заключается в том, что агенты полностью доверяют сообщенной центром информации и используют ее при принятии своих решений) агенты выберут действия $\{y_i^*(q_0)\}$, определяемые (4), что приведет к суммарному действию $Y(q_0)$, определяемому (3).

Пусть $f_0(y, q)$ целевая функция центра, Q_0 – его информация о состоянии природы. Тогда задача информационного регулирования заключается в максимизации сообщением $q_0 \hat{I} Q$ гарантиро-

ванного значения целевой функции центра на множестве равновесных при данном сообщении состояний агентов:

$$(6) \min_{q \in \Theta_0} f_0(y^*(q), q) \text{ @ } \max_{q_0 \in \Theta} .$$

Активное прогнозирование в рассматриваемой модели заключается в сообщении центром агентам информации о будущих значениях результатов их деятельности – например, о суммарном действии.

Пусть Y_0 – сообщение центра. Тогда, воспользовавшись (5), агенты могут однозначно восстановить значение $q_0 = Q(Y_0)$ состояния природы (см. рисунок 4), на которое должен бы был ориентироваться центр, рассчитывая на сообщенное им суммарное действие.

Задача активного прогнозирования заключается в максимизации сообщением $Y_0 \hat{I} A'$ гарантированного значения целевой функции центра на множестве равновесных при данном сообщении состояний агентов:

$$(7) \min_{q \in \Theta_0} f_0(y^*(q_0(Y_0)), q) \text{ @ } \max_{Y_0} .$$

При известных зависимостях (3)-(5) задачи (6) и (7) являются стандартными задачами оптимизации.

Отметим, что в данном примере эффективности активного прогноза и информационного регулирования одинаковы, так как оценка состояния природы восстанавливается по результату деятельности однозначно (см. обсуждение в разделе б).

Структуры системы управления для случаев информационно-регулирующего и активного прогноза (в котором $q = Y_0$) приведены соответственно на рисунках 10 и 11 (см. также рисунки 1-4).

Рассмотрим случай, когда затраты каждого агента возрастают по действиям других агентов (этому соответствует знак «минус» в знаменателе функции затрат (2)).

Пусть центру достоверно известно, что внешняя цена \hat{q} (описываемая переменной q) равна единице, агенты считают, что $q \hat{I} Q = [0; 3]$. Будем считать, что целевая функция центра определяется суммарным доходом $1 \times X$ за вычетом суммарных затрат агентов.

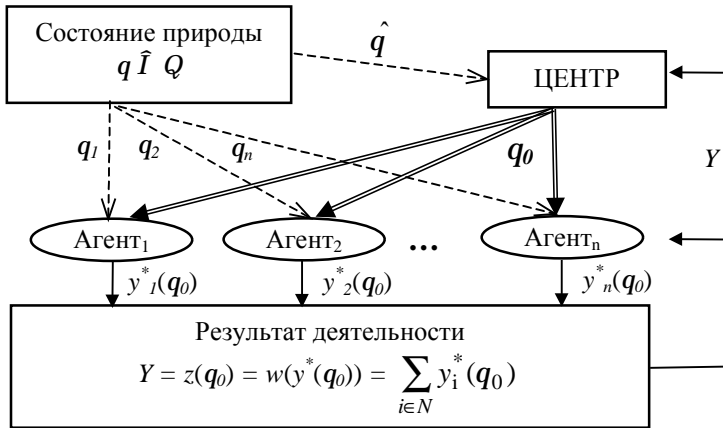


Рис. 10. Информационное регулирование

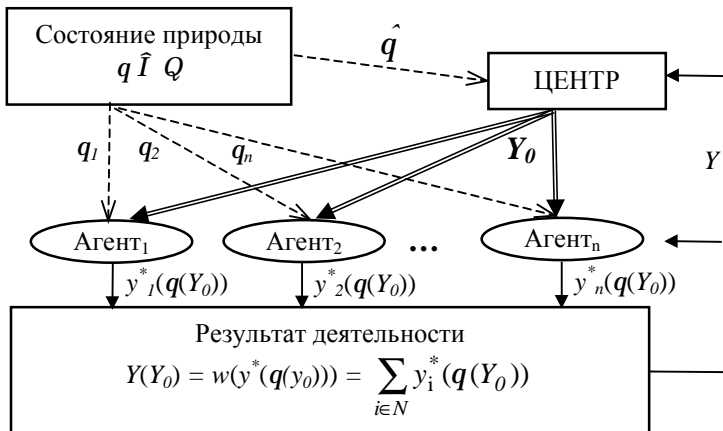


Рис. 11. Активный прогноз

Тогда задача (6) имеет вид:

$$(8) Y(q) - c_1(y^*(q), r_1) - c_2(y^*(q), r_2) \stackrel{\text{®}}{\max}_{q \in [0;3]}$$

где $Y(q)$ и $y^*(q)$ определяются, соответственно, выражениями (3) и (4). Предполагая, что агенты одинаковы ($r_1 = r_2 = 1$) и подставляя (3) и (4) в (8), получим, что целевая функция центра следующим образом зависит от его сообщения

$$(9) f_0(y^*(q), q) = \frac{q(4-q)}{4+q}.$$

Максимум выражения (9) на отрезке $[0; 3]$ достигается в точке $q^* = 4(\sqrt{2} - 1)$. Следовательно, решение задачи информационного регулирования – сообщение центром агентам оценки q^* . Отметим, что эта оценка отличается от «истинной» оценки $\hat{q} = 1$, то есть центру выгодно исказить информацию.

Небезынтересно рассмотреть вопрос о том, каковы будут выигрыши агентов в случае единичной истинной цены и сообщения центра $q^* = 4(\sqrt{2} - 1)$. Нетрудно убедиться, что выигрыш каждого из них будет меньше ожидаемого, но больше того выигрыша, который он получил бы в случае сообщения центром истинной цены (в обозначениях раздела 8 это запишется следующим образом: $n_5 < n_4 < n_2$). Вывод несколько парадоксальный – агентам выгодно, чтобы от них скрыли истинное значение цены. Объясняется он тем, что равновесие Нэша не является в данном случае Парето-оптимальным, и центр своим сообщением «сдвигает» точку информационного равновесия к Парето-оптимуму. Однако такое информационное управление, как мы видим, не является стабильным (имеет место несовпадение ожиданий и результата: $n_4 \neq n_2$).

Рассмотрим теперь задачу активного прогнозирования (7). Ее решение заключается в вычислении на основании информации о q^* по выражению (5) величины $Y(q^*)$ и сообщении ее агентам в качестве прогноза Y_0 их суммарных действий. Легко подсчитать, что сообщение центром $Y_0 = 2(2 - \sqrt{2})$ побуждает агентов восстановить оценку q^* состояния природы и выбрать требуемые для центра действия.

Если бы центру было невыгодно исказить информацию, то это значило бы, что именно сообщение истинного состояния природы участникам АС побуждает их прийти в наиболее выгодное

для центра состояние. Другими словами, совпадение q^* и \hat{q} является частным случаем и может рассматриваться как «случайное».

Отметим, что целевая функция центра при единичной истинной цене имеет вид

$$f_0(y, 1) = y_1 + y_2 - \frac{y_1^2}{2 - y_2} - \frac{y_2^2}{2 - y_1}.$$

Максимум этой функции на множестве $0 \leq y_1 < 2, 0 \leq y_2 < 2$ достигается в точках $y_1 = y_2 = 2 - \sqrt{2}$, которые и достигаются при помощи описанных информационного регулирования и приводящего к тому же результату активного прогноза (для того, чтобы в этом убедиться, достаточно найти максимум целевой функции центра по всем парам (y_1, y_2)). Поэтому это управление является абсолютно оптимальным.

Исследуем теперь зависимость равновесия от представления каждого из игроков об информированности другого игрока, то есть простейший пример рефлексивного управления. Так как структура целевых функций агентов такова, что при вычислении гарантированного результата используются только нижние границы соответствующих множеств значений состояний природы, то обозначим q_{ij} – нижняя граница этого множества, известная j -му игроку с точки зрения i -го игрока, $j = 1, 2$.

Посмотрим на ситуацию с точки зрения первого агента. Он осознает себя как более информированного по сравнению со вторым и «просчитывает» его действие в соответствии с предположением Π_2 (см. раздел 4). Именно, второй агент с точки зрения первого вычисляет равновесную ситуацию, подставляя в целевые функции значение q_{12} . В результате y_{12}^* – равновесная стратегия второго игрока с точки зрения первого – вычисляется следующим образом (см. (4); напомним, что рассматривается случай « \leftrightarrow » при

$$r_1 = r_2 = 1): y_{12}^* = \frac{2q_{12}}{4 + q_{12}}.$$

Подставляя это значение в свою целевую функцию, первый агент вычисляет свою стратегию:

$$y_1^* = \operatorname{argmax}_{y_1 \in [0, 2]} f(y_1, y_{12}^*, q_{11}) = \operatorname{argmax}_{y_1 \in [0, 2]} \left(\frac{q_{11}}{2} (y_1 + y_{12}^*) - \frac{y_1^2}{2 - y_{12}^*} \right) = \frac{2q_{11}}{4 + q_{12}}.$$

Аналогично вычисляется равновесная стратегия второго агента: $y_2^* = \frac{2q_{22}}{4 + q_{21}}$.

Как было упомянуто выше, сообщение обоим агентам значения $q^* = 4(\sqrt{2} - 1)$ является абсолютно оптимальным управлением центра. Поэтому и здесь (в рамках рефлексивного управления) оптимальным будет сообщение $q_{11} = q_{12} = q_{21} = q_{22} = 4(\sqrt{2} - 1)$.

9.3. ПРИМЕР 3 (КОНКУРЕНЦИЯ НА РЫНКЕ)

Если в примере 1 рынок был ненасыщен, и подразделения рассматриваемой фирмы могли продавать на рынке любое количество продукции по фиксированной цене, которая являлась неопределенным параметром (состоянием природы), то в данном примере предполагается, что спрос задан экзогенно в виде $Y(I)$, где Y – суммарный выпуск (суммарное действие агентов), а I – рыночная цена. Если $Y(x)$ – строго монотонно убывающая непрерывная функция, то существует обратная ей функция $I(Y)$, отражающая зависимость рыночной цены от предложения, которая также строго монотонно убывает и непрерывна. Предположим, что агентам не известны эффективности (параметры функций затрат) друг друга.

Целевая функция j -го агента с точки зрения i -го агента есть:

$$(1) f_{ij}(y, q_i) = I(Y) y_{ij} - \frac{y_{ij}^2}{2\theta_{ij}}, \quad i, j \in \hat{I} \cap N,$$

где $y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in \hat{I} \cap A'$ – вектор действий агентов, имеющих сепарабельные затраты $c_j(y) = y^2 / 2 r_j$, $j \in \hat{I} \cap N$, $q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in})$ – вектор параметров (соответствующих границ множеств возможных значений неопределенных параметров), отражающий представления i -го агента об эффективности его деятельности r_i и эффективностях $\{r_j\}_{j \in \hat{I}}$ деятельности других агентов.

Из условий равновесия получаем действия агентов:

$$(2) y_{ij}^*(q_i) = \frac{q_{ij} I(Y)}{1 - I'(Y) q_{ij}}, \quad i, j \in \hat{I} \cap N.$$

Пусть $I(Y) = I_0 - gY$, $I_0, g > 0$. Подставляя $I(Y)$ в (2), получаем:

$$(3) y_{ij}^*(q_i) = \frac{q_{ij} I_0}{(1 + gq_{ij})(1 + ga_i)}, \quad i, j \in \hat{I} N,$$

где

$$(4) a_i = \sum_{j \in N} \frac{q_{ij}}{1 + gq_{ij}}, \quad i \in \hat{I} N.$$

Таким образом, информационным равновесием будет вектор

$$(y_{11}^*(q_1), y_{22}^*(q_2), \dots, y_{nn}^*(q_n)).$$

Исследуем информационное равновесие для случая двух агентов ($n = 2$), каждый из которых достоверно знает свой тип ($q_{ii} = r_i$) и имеет некоторые предположения (q_{12}, q_{21}) о типе партнера. Пусть при этом $r_1 = r_2 = I_0 = g = 1$.

Из (3) получаем, что суммарное действие в зависимости от предположений агентов о типе партнера равно

$$(5) Y(q_{12}, q_{21}) = \frac{2 + a_1 + a_2}{2(1 + a_1)(1 + a_2)},$$

где $a_1 = 1/2 + q_{12}/(1 + q_{12})$, $a_2 = 1/2 + q_{21}/(1 + q_{21})$. Линии уровня функции (5) приведены на рисунке 12.

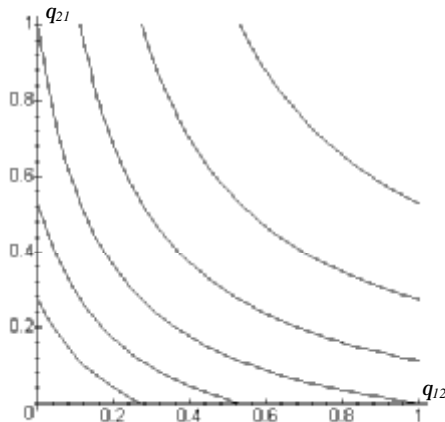


Рис. 12. Линии уровня суммарного действия в зависимости от представлений агентов друг о друге

Имея зависимости (1)-(5), можно формулировать и решать задачи информационного регулирования и активного прогнозирования, исследовать иерархические игры с сообщениями агентов друг другу об эффективности деятельности и т.д.

Рассмотрим задачу активного прогнозирования. Пусть задача центра заключается в обеспечении суммарного действия равного Y_0 . Рассмотрим, какой прогноз Y_0 решает эту задачу.

С точки зрения первого агента, которому сообщен прогноз Y_0 , целевые функции выглядят следующим образом:

$$f_1(y_1, y_2) = (1 - y_1 - y_2) y_1 - \frac{y_1^2}{2},$$

$$f_2(y_1, y_2) = (1 - y_1 - y_2) y_2 - \frac{y_2^2}{2r_2},$$

где параметр r_2 ему неизвестен. Для нахождения равновесия Нэша первый агент приравнивает к нулю производные этих функций, что приводит (с учетом прогноза) к следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} 1 - y_2 - 3y_1 = 0, \\ 1 - y_1 - \left(\frac{1}{r_2} + 2 \right) y_2 = 0, \\ y_1 + y_2 = Y_0. \end{cases}$$

Эта система имеет единственное решение

$$y_1 = \frac{1 - Y_0}{2}, \quad y_2 = \frac{3Y_0 - 1}{2}, \quad r_2 = \frac{3Y_0 - 1}{3 - 5Y_0}.$$

Заметим, что по смыслу ситуации эти три значения должны быть положительны. Это накладывает естественное ограничение на возможные сообщения центра:

$$\frac{1}{3} < Y_0 < \frac{3}{5}.$$

В итоге получаем, что равновесная стратегия первого агента такова:

$$y_1^* = \frac{1 - Y_0}{2}.$$

Рассуждая аналогично с точки зрения второго агента, получаем его равновесную стратегию:

$$y_2^* = \frac{1 - Y_0}{2}.$$

Таким образом, сообщая прогноз Y_0 , центр добивается суммарного действия $Y = y_1^* + y_2^* = 1 - Y_0$. Очевидно, единственным точным прогнозом центра в описываемой ситуации является $Y_0 = 1/2$.

Пусть теперь зависимость цены от суммарного действия двух агентов задается соотношением $I(Y) = 1/Y$. Тогда целевые функции агентов имеют вид

$$f_1(y_1, y_2) = \frac{y_1}{y_1 + y_2} - \frac{y_1^2}{2}, \quad f_2(y_1, y_2) = \frac{y_2}{y_1 + y_2} - \frac{y_2^2}{2r_2}.$$

Дифференцируя эти функции по соответствующим переменным и приравнявая производные к нулю, найдем равновесные стратегии агентов:

$$y_1^* = \frac{\sqrt[4]{r_1 r_2}}{\sqrt{r_1} + \sqrt{r_2}} \sqrt{r_1}, \quad y_2^* = \frac{\sqrt[4]{r_1 r_2}}{\sqrt{r_1} + \sqrt{r_2}} \sqrt{r_2}.$$

Предположим, что $r_1 = r_2 = 1$, и каждому агенту известен свой тип, но неизвестен тип другого агента, то есть первому агенту неизвестно значение r_2 , а второму – значение r_1 .

Будем считать, что центр стремится минимизировать цену, сообщая агентам ее прогноз. Выясним, какой прогноз является оптимальным (то есть минимизирующим реальное значение цены).

Если центр сообщает прогноз цены I , то первый агент может определить тип второго агента \tilde{r}_2 из уравнения

$$\frac{1}{I} = y_1^* + y_2^* = \sqrt[4]{r_1 \tilde{r}_2} = \sqrt[4]{\tilde{r}_2}.$$

Имеем: $\tilde{r}_2 = \frac{1}{I^4}$, откуда

$$y_1^* = \frac{\sqrt[4]{\tilde{r}_2}}{1 + \sqrt{\tilde{r}_2}} = \frac{1/I}{1 + 1/I^2} = \frac{I}{I^2 + 1}.$$

Повторяя эти же рассуждения для второго агента, получаем его равновесную стратегию: $y_2^* = \frac{I}{I^2 + 1}$.

Таким образом, при сообщении центром прогноза цены I истинное значение цены L окажется следующим:

$$L(I) = \frac{1}{y_1^* + y_2^*} = \frac{I^2 + 1}{2I}.$$

Легко видеть, что минимум функции $L(I)$ достигается в точке $I = 1$. Это значение и будет оптимальным. При этом $L(1) = 1$, то есть оптимальный прогноз центра является точным прогнозом, а информационное управление – стабильным (нетрудно убедиться, что агенты получают именно те выигрыши, на которые рассчитывали при выборе стратегии).

9.4. ПРИМЕР 4 (РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА)

Предположим, что целевая функция агента, имеющего тип²⁵ r_i , определяется разностью между доходом $j_i(x_i, r_i)$ от обладания ресурсом x_i , и затратами $I x_i$, связанными с его приобретением по цене I :

$$(1) f_i(I, x_i, r_i) = j_i(x_i, r_i) - I x_i, \quad i \in \hat{I} \subset N.$$

Если типы агентов $\{r_i\}$ неизвестны центру, осуществляющему распределение ресурса, то он может использовать механизм с сообщением информации от агентов [12, 65].

Пусть $j_i(x_i, r_i) = 2 \sqrt{r_i x_i}$, $i \in \hat{I} \subset N$. Тогда оптимальное для i -го агента количество ресурса равно

$$(2) x_i(I) = r_i / I^2, \quad i \in \hat{I} \subset N.$$

Пусть центр обладает ресурсом R_0 . Тогда из условия $\sum_{i \in N} x_i(I) = R_0$ он может заранее определить равновесную цену:

²⁵ Данный параметр агента может интерпретироваться как эффективность использования ресурса.

$$(3) I = \sqrt{\frac{R}{R_0}},$$

где $R = \sum_{i \in N} r_i$.

Агенты не знают цену I , однако им известен механизм ее определения (3).

Обозначим $q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in})$ – вектор параметров (соответствующих границ множеств возможных значений неопределенных параметров), отражающий представления i -го агента об эффективности его деятельности r_i и эффективностях $\{r_j\}_{j \neq i}$ деятельности других агентов; $R_i = \sum_{j \in N} q_{ij}$. Агент с номером i при известном R_0 в

силу (3) рассчитывает на установление цены

$$(4) I = \sqrt{\frac{R_i}{R_0}}, i \in N.$$

Из (2) следует, что он стремится приобрести ресурс в объеме

$$(5) x_i^*(q_i) = \frac{r_i}{R_i} R_0, i \in N.$$

При этом суммарный спрос на ресурс составляет

$$(6) Y(q) = \sum_{i \in N} x_i^*(q_i) = R_0 \sum_{i \in N} \frac{r_i}{R_i}.$$

Если представления агентов, вообще говоря, не соответствуют действительности ($q_{ij} \neq r_j$), то при $\sum_{i \in N} \frac{r_i}{R_i} \neq 1$, возникает дисбаланс.

В частности, если $Y(q) > R_0$, то равновесная цена превышает I , а если $Y(q) < R_0$, то равновесная цена оказывается меньше, чем I . Традиционно (например, на валютном рынке) центр добивается удержания цены в нужном для него диапазоне либо изменением объема ресурса²⁶, предлагаемого агентам к продаже, либо выступая в качестве одного из игроков. Для определения количества

²⁶ Изменение цены может рассматриваться как мотивационное управление, изменение количества ресурсов – как институциональное управление.

ресурса, обеспечивающего заданную равновесную цену при известной информированности агентов, достаточно воспользоваться выражением (6).

Рассмотрим возможности центра по информационному управлению на примере АС, состоящей из двух агентов с информированностями: $q_1 = (r_1, q_{12})$, $q_2 = (q_{21}, r_2)$. Содержательно, каждый агент знает свой тип и имеет некоторую информацию (быть может, недостоверную) о типе другого игрока.

Вычисляем: $R_1 = r_1 + q_{12}$, $R_2 = q_{21} + r_2$, $x_1^*(q_1) = r_1 R_0 / (r_1 + q_{12})$, $x_2^*(q_2) = r_2 R_0 / (r_2 + q_{21})$. Условие баланса имеет вид:

$$(7) \frac{r_1}{r_1 + q_{12}} + \frac{r_2}{r_2 + q_{21}} = 1.$$

Отметим, что (7) выполняется, в частности, при полной информированности агентов, которой соответствует выполнение равенств $q_{12} = r_2$, $q_{21} = r_1$. Преобразуя (7), получаем, что условие баланса можно записать в виде:

$$(8) r_1 r_2 = q_{12} q_{21}.$$

Информационному регулированию в рассматриваемой модели соответствует сообщение агентам информации о типах партнеров, удовлетворяющей (8), что обеспечивает сбалансированность рынка (отметим, что равновесная цена при этом может отличаться от I), то есть достижение цели центра (7).

Предположим, что центр может использовать только однородное информационное регулирование (то есть сообщать всем агентам одну и ту же величину). Из (8) следует, что в случае двух агентов это предположение не снижает эффективности управления – центру достаточно сообщить $q_0 = \sqrt{r_1 r_2}$.

Рассмотрим задачу активного прогнозирования. Пусть центр сообщает агентам прогноз отношения объемов приобретаемых ресурсов:

$$k = \frac{x_1}{x_2}.$$

На основании этой информации каждый агент определяет тип другого агента, исходя из соотношений (вытекающих из (5))

$$\frac{r_1}{q_{12}} = \frac{q_{21}}{r_2} = k.$$

Выпишем равновесные стратегии агентов:

$$(9) \quad x_1^* = \frac{r_1}{r_1 + q_{12}} R_0 = \frac{k}{1+k} R_0, \quad x_2^* = \frac{r_2}{r_2 + q_{21}} R_0 = \frac{1}{1+k} R_0.$$

Из (9) видно, что центр, сообщая значение $k \in (0, +\infty)$, может добиться распределения ресурса R_0 между агентами в любой пропорции. При этом для любого k прогноз является точным.

Однако информационное управление посредством сообщения k является стабильным лишь при

$$(10) \quad k = \frac{r_1}{r_2},$$

то есть при сообщении центром истинного соотношения типов. При любом другом сообщении агенты неверно восстанавливают значение I , а, следовательно, свой ожидаемый выигрыш. Например, первый агент рассчитывает на цену (см. (3))

$$\tilde{I} = \sqrt{\frac{r_1 + q_{12}}{R_0}} = \sqrt{\frac{r_1 + r_1/k}{R_0}},$$

а на самом деле она будет составлять $I = \sqrt{\frac{r_1 + r_2}{R_0}}$.

Видно, что $I = \tilde{I}$ лишь при условии (10).

9.5. ПРИМЕР 5 (АУКЦИОН)

Пусть центр обладает R_0 единицами ресурса. Размер возможной заявки от каждого из агентов фиксирован и равен x_0 (для простоты будем считать, что $k = R_0/x_0$ – целое число). Агенты сообщают центру цену $\{y_i\}$, по которой они готовы приобрести ресурс, затем центр упорядочивает агентов по убыванию предложенных цен и продает ресурс по заявленным ценам – сначала агенту, предложившему максимальную цену, затем – следующему за ним и т.д., пока не закончится весь ресурс.

Пусть $j_i(x_i, r_i)$ – доход i -го агента от использования ресурса (возрастающая функция, удовлетворяющая условию $j_i(0, r_i) = 0$), где r_i – тип агента, характеризующий эффективность использования им ресурса, то есть $j_i(\cdot)$ возрастает по r_i , $i \in \bar{I}$. Из условия

индивидуальной рациональности (неотрицательности целевой функции)²⁷ $f_i(y, x_i, r_i) = j_i(x_i, r_i) - y_i x_0$ получаем максимальную цену $p_i(r_i)$, которую готов заплатить данный агент за получение ресурса.

Упорядочим агентов по убыванию типов²⁸: $r_1 \geq r_2 \geq \dots \geq r_n$. В силу введенных предположений упорядочение агентов по максимальным ценам будет такое же: $p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_n$.

В условиях полной информированности равновесными будут следующие сообщения (так называемое аукционное решение): $y_i^* = p_{k+1} + d$, $i = \overline{1, k}$, $y_i^* = 0$, $i = \overline{k+1, n}$, где d – сколь угодно маленькая строго положительная константа, то есть первые k агентов – победители аукциона – приобретут ресурс почти по цене первого проигравшего, а все проигравшие откажутся от участия в аукционе.

Построенное аукционное решение будет реализовано только если все агенты имеют достоверную информацию о типах (и, следовательно, максимальных ценах) друг друга. Рассмотрим, что произойдет в случае, когда агенты не имеют достоверной информации о типах друг друга.

Пусть $n = 2$, $k = 1$, и информированность агентов следующая: $q_1 = (p_1, q_{12})$, $q_2 = (q_{21}, p_2)$. Содержательно, каждый агент знает свою максимальную цену и имеет некоторую информацию (быть может, недостоверную) о максимальной цене другого игрока.

Пусть для определенности $p_1 > p_2$. Тогда зависимость информационного равновесия от информации игроков примет вид, представленный на рисунке 13.

Обсудим возможные комбинации значений (q_{12}, q_{21}) , то есть области I – VII на рисунке 13.

Отметим, что полной информированности соответствует точка A, в которой побеждает первый агент, приобретая ресурс по цене p_2 . Будем считать, что, если некоторый агент полагает, что

²⁷ Отказываясь от участия в аукционе, агент всегда может обеспечить себе нулевое значение целевой функции.

²⁸ Будем считать, что, если типы двух агентов совпадают, то существует правило, по которому они упорядочиваются.

противник сильнее него, то он отказывается от участия в аукционе²⁹.

В области *I* оба агента отказываются от участия в аукционе, так как каждый ошибочно полагает, что противник сильнее его.

В области *II* ошибаются оба агента, но первый отказывается от участия в аукционе и побеждает второй агент, приобретая ресурс по цене $q_{21} < p_2$.

В области *III* в аукционе участвуют оба агента, побеждает первый агент, приобретая ресурс по цене $q_{12} > p_2$.

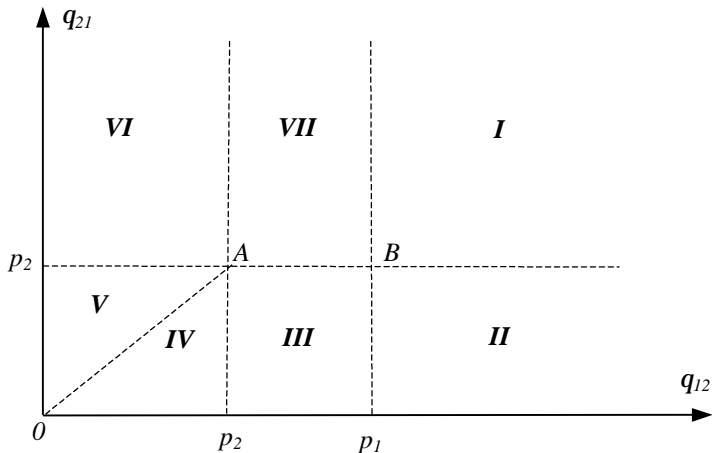


Рис. 13. Информационное равновесие в примере «Аукцион»

То же самое происходит в области *IV*, за исключением того, что цена $q_{12} < p_2$.

В области *V* в аукционе участвуют оба игрока, побеждает второй игрок, приобретая ресурс по цене $q_{21} < p_2$.

²⁹ Альтернативой является введение предположения, что в подобной ситуации агент предпочтет сообщить свою максимальную цену, то есть достоверную информацию, для того, чтобы застраховаться на случай неправильных своих представлений о противнике. Этот случай более выгоден для центра, так как при представлениях агентов друг о друге, попадающих в область *I* (см. рисунок 11), итогом будет точка *B*, а не срыв аукциона.

В области VI второй игрок отказывается от участия в аукционе, побеждает первый игрок, приобретая ресурс по цене $q_{12} < p_2$.

То же самое происходит в области VII, за исключением того, что цена $q_{12} > p_2$.

Будем считать, что центр заинтересован, в первую очередь, в том, чтобы реализовать ресурс, и во вторую очередь – чтобы реализовать его по максимально возможной (или превышающей равновесную цену p_2) цене. Тогда множества информационных равновесий I-VII (см. рисунок 13) можно упорядочить следующим образом (знак “<” обозначает, что одно множество равновесий хуже другого с точки зрения центра, знак “?” – что соотношение зависит от конкретных точек, определяющих соответствующие цены, внутри множеств):

$$I < II ? IV ? V ? VI < III ? VII$$

Качественно, центру выгодно, чтобы первый агент знал, что он может победить, но чтобы он как можно выше оценивал максимальную цену второго игрока (информация, которой обладает при этом второй (в рамках априори принятого их упорядочения) агент не существенна). В то же время, априори второй игрок не должен знать, что он не является победителем³⁰ (область VI невыгодна центру).

Следовательно, в рассматриваемом примере информационное управление заключается в сообщении центром агентам такой информации о партнерах, которая побудила бы их прийти в наиболее выгодное для центра информационное равновесие.

9.6. ПРИМЕР 6 (АККОРДНАЯ ОПЛАТА ТРУДА)

Рассмотрим АС с двумя агентами, имеющими функции затрат $c_i(y_i) = y_i^2 / 2r_i$, где r_i – тип i -го агента, $y_i \in A_i = \mathbb{R}_1^+$, $i = 1, 2$. Целевая функция i -го агента представляет собой разность между стимулированием $S_i(y_1, y_2)$, получаемым от центра, и затратами, то есть: $f_i(y) = S_i(y) - c_i(y_i)$, $i = 1, 2$.

Пусть центр использует систему стимулирования

³⁰ Ситуация усложняется, если рассматривать информированности игроков об информированностях друг друга.

$$(1) s_i(y_1, y_2) = \begin{cases} C_i, & y_1 + y_2 \geq x \\ 0, & y_1 + y_2 < x \end{cases}, i = 1, 2.$$

Содержательно, центр выплачивает каждому агенту фиксированное вознаграждение при условии, что сумма их действий оказывается не меньше, чем некоторое плановое значение $x > 0$. Обозначим $y_i^+ = \sqrt{2r_i C_i}$, $i = 1, 2$, $Y = \{(y_1, y_2) \mid y_i \leq y_i^+, i = 1, 2, y_1 + y_2 \leq x\}$ – множество индивидуально-рациональных действий агентов. Рассмотрим четыре возможных комбинации переменных (см. рисунки 14–17).

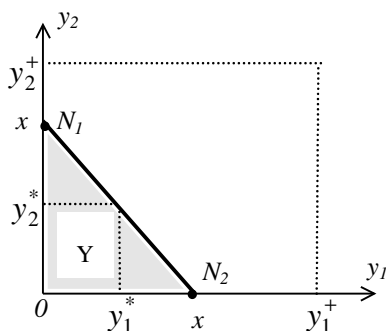


Рис. 14

В первом случае (см. рисунок 14) множество равновесий Нэша составляет отрезок: $E_N(s) = [N_1 N_2]$. Фиксируем произвольное равновесие $y^* = (y_1^*, y_2^*) \in E_N(s)$. Наличие «большого» равновесия Нэша (отрезка, содержащего континуум точек) имеет несколько минусов с точки зрения эффективности стимулирования. Поясним это утверждение

Так как все точки отрезка $[N_1 N_2]$ эффективны по Парето с точки зрения агентов, то при определении эффективности системы стимулирования центр вынужден (в зависимости от своей функции полезности) либо использовать гарантированный результат (вычислять минимум по этому отрезку), либо доплачивать агентам за выбор конкретных действий из этого отрезка малую, но строго положительную, величину.

Построим систему индивидуального стимулирования в соответствии с результатами, приведенными в [70, 71]:

$$(2) \tilde{s}_1^*(y_1) = s_1(y_1, y_2^*) = \begin{cases} C_1, & y_1 \geq y_1^* \\ 0, & y_1 < y_1^* \end{cases},$$

$$\tilde{s}_2^*(y_2) = s_2(y_1^*, y_2) = \begin{cases} C_2, & y_2 \geq y_2^* \\ 0, & y_2 < y_2^* \end{cases}.$$

При использовании этой системы стимулирования точка $y^* = (y_1^*, y_2^*)$ оказывается единственным равновесием Нэша, то есть, переходя от системы стимулирования (1) каждого агента, зависящей от действий всех агентов, к системе стимулирования (2), зависящей только от действий данного агента, центр «декомпозирует» игру элементов, реализуя при этом единственное действие. При этом эффективность стимулирования, очевидно, не только не понижается, а может оказаться более высокой, чем при использовании исходной системы стимулирования.

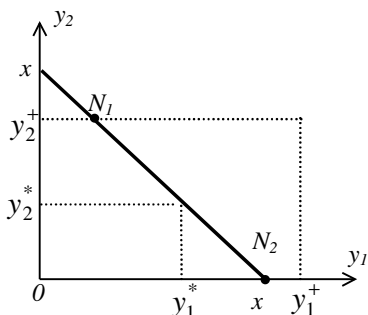


Рис. 15

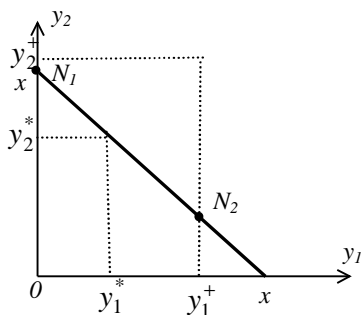


Рис. 16

Во втором и третьем случаях равновесием Нэша являются отрезки $[N_1 N_2]$, изображенные на рисунках 15 и 16 соответственно.

И, наконец, в четвертом случае (см. рисунок 17) множество равновесий Нэша состоит из точки $(0; 0)$ и отрезка $[N_1 N_2]$, то есть $E_N(s) = (0; 0) \dot{\cup} [N_1 N_2]$, причем точки интервала $(N_1 N_2)$ являются недоминируемыми по Парето другими равновесиями, то есть:

$$(N_1 N_2) = \text{Par} (E_N(s), \{f_i\}).$$

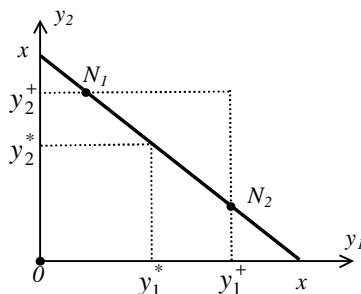


Рис. 17

Пусть в условиях рассматриваемого примера функции затрат агентов несепарабельны и имеют вид: $c_i(y) = \frac{(y_i + a y_{-i})^2}{2r_i}$. Определим множество Y индивидуально-рациональных действий аген-

тов: $Y = \{(y_1, y_2) / c_i(y) \notin C_i, i = 1, 2\}$. Для того чтобы не рассматривать все возможные комбинации значений параметров $\{r_1, r_2, C_1, C_2, x\}$ возьмем случай, представленный на рисунке 18.

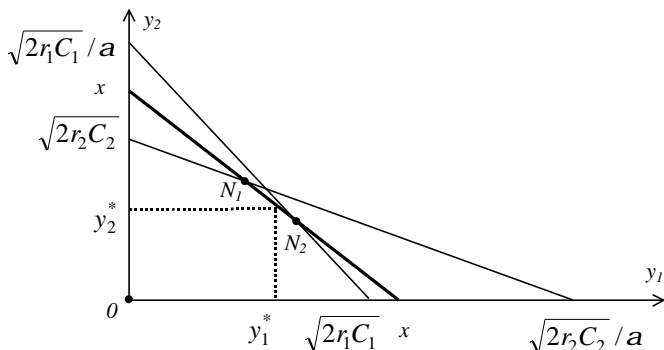


Рис. 18. Множество равновесий Нэша $[N_1 N_2]$ в случае несепарабельных затрат

В рассматриваемом случае множество равновесий Нэша включает отрезок $[N_1 N_2]$. Система стимулирования

$$(3) \tilde{S}_1^*(y) = \begin{cases} c_1(y_1^*, y_2), & y_1 = y_1^* \\ 0, & y_1 \neq y_1^* \end{cases} \quad \tilde{S}_2^*(y) = \begin{cases} c_2(y_1, y_2^*), & y_2 = y_2^* \\ 0, & y_2 \neq y_2^* \end{cases}$$

реализует действие $y^* \hat{I} [N_1 N_2]$ как равновесие в доминантных стратегиях.

Система стимулирования (3) имеет эффективность не меньшую, чем исходная система стимулирования с теми же параметрами C_1 и C_2 (см. выражение (2)). Она в точности компенсирует затраты агентов, а система стимулирования (2) «переплачивала» следующую величину: $DC = C_1 - c_1(y^*) + C_2 - c_2(y^*)$, которая неотрицательна в силу индивидуальной рациональности агентов.

Итак, мы рассмотрели задачу стимулирования (мотивационного управления) в случае полной информированности. Пусть каждый агент имеет некоторые (быть может, недостоверные) представления о типе другого агента (обозначения соответствуют используемым в примерах 4 и 5). Вычислим $q_{12}^{\min} = (x - \sqrt{2r_1C_1})^2 / 2C_2$, $q_{21}^{\min} = (x - \sqrt{2r_2C_2})^2 / 2C_1$. Тогда при $q_{12} \leq q_{12}^{\min}$ первый агент отказывается от участия в АС (так как в соответствии

с его представлениями выполнение плана невыгодно), а при $q_{21} \leq q_{21}^{\min}$ по тем же причинам второй агент отказывается от участия в АС. Таким образом, агенты будут выполнять план при значениях представлений друг о друге, принадлежащих области, заштрихованной на рисунке 19. Требуемые, то есть предпочтительные для центра, представления агентов друг о друге могут быть сформированы им в рамках рефлексивного управления.

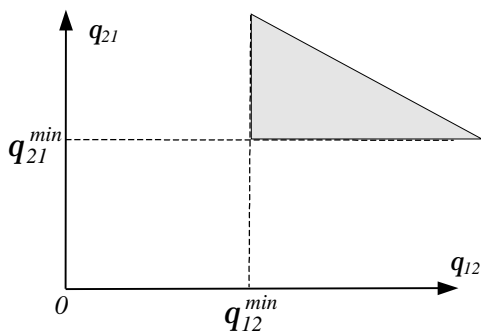


Рис. 19. Участие агентов в АС в зависимости от их представлений

Перейдем к обсуждению проблем информационного управления в рассматриваемой модели.

В [4, 5] изучаются задачи прогнозируемости развития социально-экономических систем и их связь с динамикой коллективного поведения.

Предположим, что исследователь имеет полную информацию о целевых функциях и допустимых множествах элементов системы. Тогда, приняв ту или иную концепцию равновесия (в экономических моделях – это, как правило – равновесие Нэша, и в дальнейшем мы ограничимся рассмотрением именно некооперативных игр), можно определить точку равновесия. Казалось бы, система в этом случае полностью прогнозируема (вопроса об адекватности модели мы не рассматриваем).

Если целевые функции игроков зависят от времени, то, определяя последовательность точек равновесия, соответствующих различным периодам функционирования, можно получить траек-

торию состояний системы, то есть прогноз ее развития. Однако точность такого прогноза может оказаться крайне низкой, в частности, в силу следующих причин. Если элементы системы обладают примерно такой же полной информацией, что и исследователь, то, наверное, реальная траектория будет близка к прогнозной. Однако, если, например, предпочтения агентов являются частной информацией, то вряд ли можно ожидать, что система сразу окажется в равновесии. Такая недостаточная взаимная информированность имеет место, в частности, в системах с большим числом элементов [61, 62, 72]. А если система не находится в равновесии, значит агенты начнут изменять свои стратегии, пытаясь "нащупать" равновесие.

Предположим, что точка равновесия существует, и агенты ведут себя таким образом, что траектории системы сходятся к этой точке (в зависимости от модели время попадания в точку равновесия может быть конечным или бесконечным). Тогда, если характерное время сходимости окажется много больше периода функционирования системы, то сделанный прогноз заведомо ошибочен. В этом случае необходимо рассматривать динамику поведения элементов системы в процессе достижения равновесия – динамику коллективного поведения.

В рамках модели коллективного поведения необходимо определить, какую стратегию будут выбирать агенты при сложившихся конкретных обстоятельствах (обстановке игры). Это достаточно сложная задача, так как выбор конкретной стратегии может зависеть, например, от психологических особенностей принятия решения данным агентом, что существенно затрудняет прогноз его поведения. Для решения этой задачи может быть введена гипотеза выбора стратегий агентами.

Пусть исследователь, исходя из своих представлений об агентах, характере их возможной деятельности и т.д., выдвинул такую гипотезу. В этом случае (если рассматривается динамическая игра) последовательность выбранных стратегий будет удовлетворять динамической системе, где стратегия каждого элемента на следующем шаге зависит от выигрыша, полученного на предыдущем шаге (и тем самым от стратегии на предыдущем шаге), и от правил игры – управления в данной динамической системе.

Задача анализа поведения динамической системы достаточно сложна, а нахождение решения динамической системы является чрезвычайно трудоемким. Даже в одной из самых простых гипотез – гипотезе индикаторного поведения (см. ниже) на каждом шаге приходится решать задачу поиска глобального экстремума функции многих переменных, что делает нахождение точного и полного решения системы нецелесообразным, тем более что полную картину поведения решений можно установить лишь имея решения с достаточно широким набором начальных условий. Поэтому основное внимание следует уделять качественному анализу полученной динамической системы: выделению инвариантных множеств фазового пространства, исследованию их устойчивости и нахождению областей их притяжения. С этой точки зрения существование, например, устойчивого равновесия динамической системы будет означать наличие равновесия Нэша и т.д.

Более того, рассмотрение зависимости выбираемых элементами стратегий от управления дает возможность исследовать управляемость данной системы. Наличие полной управляемости будет означать, что, выбирая управление, можно заставить элементы за конечное число шагов прийти, например, в некоторую окрестность точки равновесия или осуществить предельный цикл.

Более общей является модель, в которой делается предположение о множестве, в котором, в зависимости от обстановки, элемент может выбрать свою стратегию. Такая "размытая" гипотеза о поведении элемента приведет к построению динамической системы в виде разностного включения. Результаты исследования такой модели оказываются менее точными, однако, все же способны дать качественную информацию. Наконец, исследователь может оценить вероятность того или иного решения элемента. В этом случае решением соответствующей динамической системы будет случайный процесс, и в распоряжении исследователя окажется прогноз в виде оценок вероятностей нахождения системы в определенном состоянии [4, 5].

Трудности исследования динамики коллективного поведения и возможности управления ею можно продемонстрировать на рассматриваемом примере аккордной оплаты труда. Проведенный выше анализ показывает, что: в зависимости от значений параметров модели может существовать одно равновесие Нэша, два или

бесконечное число. Перейдем к обсуждению динамики схождения агентов к положению равновесия.

Предположим, что имеет место полная информированность агентов друг о друге. Рассмотрим комбинацию параметров, соответствующих четвертому случаю (см. рисунок 15). Для определения процесса схождения агентов к равновесию Нэша примем следующую гипотезу их поведения. Пусть на каждом шаге (в каждый момент выбора стратегии) каждый агент выбирает стратегию, приближаясь от своей стратегии на предыдущем шаге к той стратегии, которая была бы наилучшей при условии, что другой агент выбирает ту же стратегию, что и на предыдущем шаге (*гипотеза индикаторного поведения* [72]). Эту стратегию назовем *текущим положением цели* агента.

Таким образом, текущее (на k -ом шаге) положение цели i -го агента есть

$$(4) \quad g_i^k (y_{-i}^{k-1}) = \arg \max_{y_i \in A_i} f_i(y_i, y_{-i}^{k-1}), \quad i = 1, 2, \quad k = 1, 2, \dots$$

В соответствии с гипотезой индикаторного поведения стратегия i -го агента на k -ом шаге есть

$$(5) \quad y_i^k = y_i^{k-1} + g_i^k (g_i^k (y_{-i}^{k-1}) - y_i^{k-1}), \quad i = 1, 2, \quad k = 1, 2, \dots$$

где $g_i^k \hat{I} (0; 1)$ – число, определяющее длину шага от предыдущего действия агента к текущему положению цели. Мы не будем обсуждать условия сходимости процедуры (2), единственности положения равновесия, его устойчивости и т.д., отослав заинтересованного читателя к [72].

Положим $\{g_i^k\} = g, \quad i = 1, 2, \quad k = 1, 2, \dots$. Тогда итоговое равновесие $y^*(y_0, g)$ зависит от начальной точки y_0 (действий агентов на первом шаге) и параметра g .

Обозначим $Y_0(y^*, g) = \{y \in A' / y^*(y_0, g) = y^*\}$ – *область притяжения равновесия* y^* . Области притяжения различных равновесий в рассматриваемом примере приведены на рисунке 20.

Скорость сходимости к равновесию определяется векторным параметром g , время попадания в заданную окрестность равновесия – размером этой окрестности, начальной точкой и скоростью сходимости [61, 72].

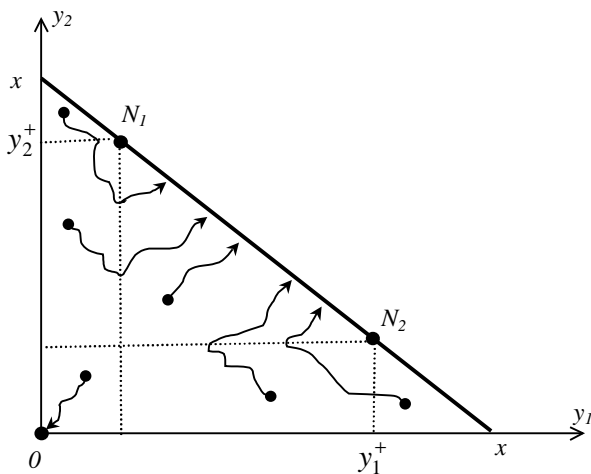


Рис. 20. Области притяжения равновесий

Видно, что в зависимости от значений параметров модели изменяются области притяжения различных точек равновесия; итоговое равновесие определяется начальной точкой, причем система не обладает непрерывной зависимостью решения от начальных данных³¹.

В более общем случае (при отказе от гипотезы индикаторного поведения) можно выявить следующие особенности: время достижения равновесия существенно зависит от начальной точки и принципов выбора стратегий игроками; если предположить, что один из игроков наделен рефлексией (знает принцип выбора стратегии партнером), а второй – нет (пример рефлексивного управления), то первый игрок за два шага приводит систему в наиболее выгодную для него точку равновесия.

Таким образом, даже рассмотрение динамики коллективного поведения не гарантирует успешности прогноза – неполная информированность о начальной точке катастрофически сказывается

³¹ Данный факт представляется чрезвычайно существенным, так как сколь угодно малая погрешность в определении начального состояния системы может привести к конечной ошибке в оценке ее конечного (равновесного) состояния.

на точности прогноза. Информация о предпочтениях игроков также является существенной – если исследователь или центр, осуществляя информационное управление, может наделить одних игроков информацией, большей, чем других, то этим он может изменить и точку равновесия, и скорость попадания в нее³².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе введена модель принятия решений (раздел 2), охватывающая известные формальные задачи управления организационными системами. В рамках этой модели определено понятие управления и выделены следующие его типы (основание классификации – целенаправленно изменяемые компоненты управляемой системы – см. раздел 3 и рисунок 21):

- **институциональное управление** (изменение допустимых множеств);

- **мотивационное управление** (изменение функций полезности);

- **информационное управление** (изменение информации, которую агенты используют при принятии решений).

В информационном управлении предлагается различать следующие его виды (основание классификации – объекты и субъекты, информация о которых сообщается):

- **информационное регулирование** – целенаправленное влияние на информацию о состоянии природы;

- **рефлексивное управление** – целенаправленное влияние на информацию о моделях принятия субъектами решений;

³² Выше мы рассматривали задачу прогнозируемости развития системы. Исследование моделей коллективного поведения позволяет решать также и задачи управления. Так, в описываемом примере итоговая точка равновесия, время ее достижения, области притяжения и т.д. существенно зависят от значений управляющих параметров. Рассмотрение задач синтеза управлений динамическими активными системами выходит за рамки настоящей работы. Итак, можно сделать вывод, что при прогнозировании развития системы с целенаправленными элементами необходимо исследование моделей коллективного поведения и учет времени достижения равновесия.

- **активный прогноз** – целенаправленное сообщение информации о будущих значениях параметров, зависящих от состояния природы и действий субъектов (в том числе – в качестве этих параметров могут выступать результаты деятельности агентов, их действия или значения их функций полезности).

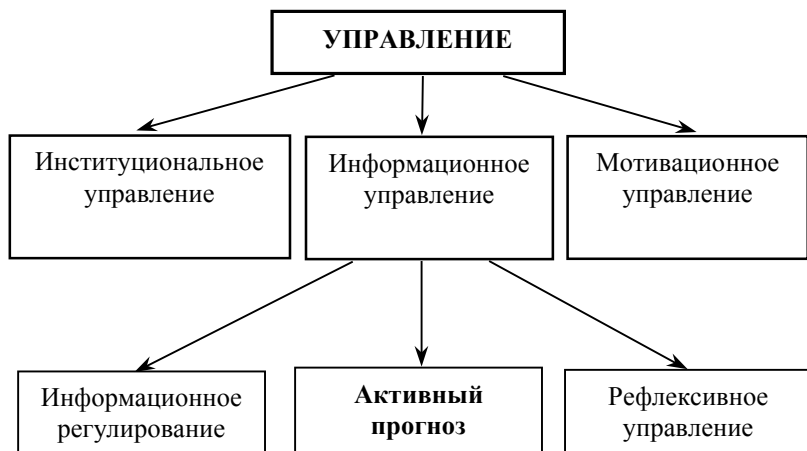


Рис. 21. Классификация управлений в организационных системах

В рамках этого подхода естественно трактовать **активный прогноз как средство управления**.

В четвертом разделе введены:

- **принцип доверия**, в соответствии с которым изменением множества допустимых стратегий центра задача информационного управления может без потери общности решаться в предположении, что агент полностью доверяет центру и использует при принятии решений в точности ту информацию, которую ему сообщил центр;

- **принцип достаточной рефлексии**, в соответствии с которым глубина рефлексии агента определяется его информированностью (в рамках предположений Π_m и Π'_m).

В пятом разделе введено понятие **информационного равновесия** как совокупности равновесных при заданной информированности стратегий агентов и сформулирована в общем виде зада-

ча информационного управления, заключающаяся в нахождении таких сообщений центра агентам, которые побуждали бы их выбирать наиболее эффективные (с точки зрения заданного критерия эффективности) действия.

В шестом разделе конкретизирована **задача активного прогнозирования** как задача такого целенаправленного сообщения информации о будущих значениях параметров, зависящих от состояния природы и действий субъектов, которое приводило бы системы в наиболее эффективные (с точки зрения заданного критерия эффективности) состояния. Кроме того, показано, что в рамках введенных предположений эффективность информационного регулирования всегда не ниже эффективности активного прогноза.

В седьмом разделе **точность активного прогноза** определена как оцениваемая сторонним наблюдателем (не входящим в рассматриваемую систему) разность между спрогнозированным центром и фактически реализовавшимся состояниями системы, а **эффективность активного прогноза** определена как значение критерия эффективности состояния системы, в котором она оказалась под влиянием этого прогноза.

Восьмой раздел посвящен формализации и исследованию таких свойств информационного управления как его стабильность и согласованность. По аналогии с неманипулируемым и согласованным мотивационным управлением предложено называть информационное управление **стабильным**, если в его результате агент получает тот выигрыш, на который он рассчитывал, и **согласованным**, если выигрыш агента в присутствии информационного управления не меньше, чем выигрыш в его отсутствии. Также показано, что стабильное информационное управление всегда является субъективно (то есть с точки зрения агента) согласованным.

Девятый раздел содержит **решения задач информационного управления** для ряда частных моделей, в том числе – примеры формальных моделей активного прогноза.

Общим (декларативным) перспективным направлением дальнейших исследований является разработка и исследование формальных (теоретико-игровых, имитационных и др.) моделей информационного управления в социально-экономических системах.

В частности, значительный интерес представляет решение следующих задач: изучение принципов и моделей «принятия» агентом информации (теоретическое и эмпирическое исследование справедливости принципа доверия и его моделей, в том числе в многоэлементных системах – см. описание роли доверия в задачах организационного управления в [108]); исследование формальных моделей коллективного поведения субъектов с различной глубиной рефлексией и управления ими; и др.

Систематическая теоретическая и эмпирическая основа для анализа этого класса задач, практически, отсутствует [62, 65]. Исключения составляют ряд разрозненных результатов социальной психологии, маркетинга и др. (см. [32, 52, 55, 102, 106]). Единственным адекватным аппаратом описания рефлексивных взаимодействий на сегодняшний день представляются информационные расширения игр [16, 40, 41] (в том числе – метаигры Н. Ховарда [114, 115]).

В целом, можно констатировать, что исследования, проведенные для ряда частных моделей (см. девятый раздел), позволили получить для них условия, связывающие точность прогноза с параметрами системы, использующей этот прогноз. В то же время, применение прогноза как средства управления в практической деятельности следует производить достаточно осторожно, так как нередко встречаются случаи, когда прогноз оказывает неблагоприятное влияние, а существующие на сегодняшний день теоретические модели, к сожалению, не охватывают всего спектра возможных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

- 1** Абаев Л.Ч. Рефлексивный анализ и игровое моделирование / Тезисы докладов Международного симпозиума «Рефлексивное управление». М.: Институт психологии РАН. 17-19 октября. 2000 г. – 192 с.
- 2** Анисимов О.С. Методологическая культура педагогической деятельности и мышления. Москва, 1991. – 168 с.
- 3** Анисимов О.С. Методология: функции, сущность, становление. М.: РАГС, 1996. – 380 с.
- 4** Барабанов И.Н., Новиков Д.А. Механизмы управления динамическими активными системами и модели коллективного поведения / 3-я Украинская конференция по автоматическому управлению. 9-14 сент. 1996 г., Севастополь. Том 2. С. 4 – 5.
- 5** Барабанов И.Н. Прогнозируемость развития социально-экономических систем и динамика коллективного поведения / Труды международной конференции «На пути к устойчивому развитию». С. Пб. 7-11 июля 1996 г. С. 21 – 23.
- 6** Бестужев-Лада И.В. Окно в будущее. М.: Мысль, 1970. – 269 с.
- 7** Бирштейн Б., Борщевич В. Рефлексивные структуры и фондовые рынки (информационно-психологический подход) / Сборник статей Международного симпозиума «Рефлексивное управление». М.: Институт психологии РАН. 17-19 октября 2000 г. С. 153 – 161.
- 8** Бондаревская Е.В., Кульневич С.В. Педагогика: личность в гуманистических теориях и системах воспитания. Ростов н/Д: Творческий центр «Учитель», 1999. – 560 с.
- 9** Борщевич В., Олейник В, Тудос В. Информационно – логические модели рефлексивных систем / Сборник статей Международного симпозиума «Рефлексивное управление». М.: Институт психологии РАН. 17-19 октября 2000 г. С. 91 – 106.
- 10** Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. – 255 с.
- 11** Бурков В.Н., Еналеев А.К., Новиков Д.А. Механизмы стимулирования в вероятностных моделях социально-экономических систем // Автоматика и Телемеханика. 1993. № 11. С. 3 – 30.
- 12** Бурков В.Н., Еналеев А.К., Новиков Д.А. Механизмы функционирования социально-экономических систем с сообщением информации // Автоматика и Телемеханика. 1996. № 3. С. 3 – 25.

- 13 Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования организационных систем. М.: Наука, 1981. – 384 с.
- 14 Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами. М.: Синтег, 1997. – 188 с.
- 15 Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: Синтег, 1999. – 128 с.
- 16 Васин А.А., Гурвич В.А. Коалиционные ситуации равновесия в метаиграх / Вестник МГУ. Вычислительная математика и кибернетика. 1980. № 3. С. 38 – 44.
- 17 Ватель И.А., Ерешко Ф.И. Математика конфликта и сотрудничества. М.: Знание, 1973. – 64 с.
- 18 Вилкас Э.Й. Оптимальность в играх и решениях. М.: Наука. 1990. – 256 с.
- 19 Вишнев С.М. Основы комплексного прогнозирования. М.: Наука, 1977. – 289 с.
- 20 Гаазе-Раппопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. М., Наука, 1987. – 288 с.
- 21 Гвишиани Д., Лисичкин В. Прогностика. М.: Знание, 1968. – 112 с.
- 22 Гермейер Ю.Б. Игры с противоположными интересами. М.: Наука, 1976. – 327 с.
- 23 Гермейер Ю.Б. Об играх двух лиц с фиксированной последовательностью ходов // ДАН СССР. 1971. Е. 198. № 5. С. 1001 – 1004.
- 24 Горелик В.А., Кононенко А.Ф. Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах. М.: Радио и связь, 1982. – 144 с.
- 25 Грачев Г., Мельник И. Манипулирование личностью: организация, способы и технологии информационно-психологического воздействия. М.: Институт философии РАН, 1999. – 235 с.
- 26 Громыко Ю.В. Оргдеятельностные игры и развитие образования / Технология прорыва в будущее. М.: Независимый методологический университет, 1992. – 191 с.
- 27 Доценко Е.Л. Психология манипуляции: феномены, механизмы и защита. М.: ЧеРо, 2000. – 344 с.
- 28 Евтушенко В.Ф. Новый взгляд на прогнозирование / Труды Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве». Новокузнецк: Издательство СибГИУ, 2001. С.14 – 17.

- 29 Ерешко Ф.И., Лохныгина Ю.В. Рефлексивные стратегии в системах управления / Труды Юбилейной международной научно-практической конференции «Теория активных систем». Общая редакция – В.Н.Бурков, Д.А.Новиков. М.: Синтег, 1999. С. 211 – 213.
- 30 Ерешко Ф.И., Лохныгина Ю.В. Исследование моделей рефлексивных стратегий в управляемых системах. М.: ВЦ РАН, 2001. – 37 с.
- 31 Ерешко Ф.И. Моделирование рефлексивных стратегий в управляемых системах. М.: ВЦ РАН, 2001. – 37 с.
- 32 Зимбардо Ф., Ляйппе М. Социальное влияние. СПб.: Питер, 2000. – 448 с.
- 33 Информационное общество: Информационные войны. Информационное управление. Информационная безопасность / Под ред. М.А. Вуса. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 1999. – 212 с.
- 34 Козелецкий Ю. Психологическая теория решений. М.: Прогресс, 1979. – 504 с.
- 35 Кононенко А.Ф. Роль информации о функции цели противника в играх двух лиц с фиксированной последовательностью ходов // ЖВМ и МФ. 1973. Том. 13. № 2. С. 311 – 317.
- 36 Кононенко А.Ф., Халезов А.Д., Чумаков В.В. Принятие решений в условиях неопределенности. М.: ВЦ АН СССР, 1991. – 197 с.
- 37 Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. М.: ФАЗИС, ВЦРАН, 2000. – 400 с.
- 38 Краткий психологический словарь. М.: Политиздат, 1985. – 431 с.
- 39 Крылов В.Ю. Методологические и теоретические проблемы математической психологии. М.: Янус-К, 2000.
- 40 Кукушкин Н.С. Роль взаимной информированности сторон в играх двух лиц с противоположными интересами // ЖВМ и МФ. 1972. Том. 12. № 4. С. 1029 – 1034.
- 41 Кукушкин Н.С., Морозов В.В. Теория неантагонистических игр. М.: МГУ, 1984. – 104 с.
- 42 Кульба В.В., Малюгин В.Д., Шубин А.Н., Вус М.А. Введение в информационное управление. С.Пб.: Изд-во С.-Петербургского Университета, 1999. – 116 с.

- 43 Лепский В.Е. Концепция субъектно-ориентированной компьютеризации управленческой деятельности. М.: Институт психологии РАН, 1998. – 204 с.
- 44 Лефевр В.А. Исходные идеи логики рефлексивных игр /Материалы конференции «Проблемы исследования систем и структур». М.: Издание АН СССР, 1965.
- 45 Лефевр В.А. Конфликтующие структуры. М.: Советское радио, 1973. – 158 с.
- 46 Лефевр В.А. Космический субъект. М., 1996.
- 47 Лефевр В.А. Логика рефлексивных игр и рефлексивное управление / Принятие решений человеком. Тбилиси: Мецниереба, 1967.
- 48 Лефевр В.А. Формула человека. М.: Прогресс, 1991.
- 49 Лефевр В.А. Элементы логики рефлексивных игр / Проблемы инженерной психологии. Вып.4. Ленинград, 1966. С. 273 – 299.
- 50 Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
- 51 Мазманова Б.Г. Основы теории и практики прогнозирования. Екатеринбург: ИПК УГТУ, 1998. – 128 с.
- 52 Майерс Д. Социальная психология. СПб.: Питер, 1998. – 688 с.
- 53 Максимов В.В., Скалозубов А.П. Матричная модель для анализа социально-рефлексивных отношений / Тезисы докладов Международного симпозиума «Рефлексивное управление». М.: Институт психологии РАН. 17-19 октября 2000 г. С. 31 – 33.
- 54 Мартино Д. Технологическое прогнозирование. М.: Прогресс, 1977. – 591 с.
- 55 Менар К. Экономика организаций. М.: ИНФРА-М, 1996.–160 с.
- 56 Модели и методы управления персоналом / Под. ред. Е.Б. Моргунова. М.: Интел-Синтез, 2001. – 464 с.
- 57 Найн А.Я. Рефлексивное управление образовательным учреждением. Шадринск: Исеть, 1999. – 328 с.
- 58 Новиков А.М. Методология образования. М.: Эгвес, 2002.
- 59 Новиков Д.А. Активные системы: управление и прогнозирование / Труды международной конференции «На пути к устойчивому развитию». С.Пб. 7-11 июля 1996 г. С. 18 – 20.
- 60 Новиков Д.А. Активный прогноз как метод управления / Труды III Международного семинара футурологов. Москва 26-30 апреля 1997 г. С. 84 – 86.

- 61** Новиков Д.А. Динамика поведения систем с большим числом целенаправленных элементов // Автоматика и Телемеханика. 1996. № 4. С. 187 –189.
- 62** Новиков Д.А. Закономерности итеративного научения. М.: ИПУ РАН, 1998. – 96 с.
- 63** Новиков Д.А. Механизмы гибкого планирования в активных системах с неопределенностью // Автоматика и Телемеханика. 1997. № 7.
- 64** Новиков Д.А. Механизмы стимулирования в динамических и многоэлементных социально-экономических системах // Автоматика и Телемеханика. 1997. № 6. С. 3 – 26.
- 65** Новиков Д.А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем. М.: Фонд "Проблемы управления", 1999.-150с.
- 66** Новиков Д.А. Обобщенные решения задач стимулирования в активных системах. М.: ИПУ РАН, 1998. – 68 с.
- 67** Новиков Д.А. Оптимальные механизмы стимулирования в активной системе с вероятностной неопределенностью. III // Автоматика и Телемеханика. 1995. N 12.
- 68** Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем. М.: СИНТЕГ, 1999. – 108 с.
- 69** Новиков Д.А. Стимулирование в социально-экономических системах (базовые математические модели). М.: ИПУ РАН, 1998. – 216 с.
- 70** Новиков Д.А., Цветков А.В. Механизмы функционирования многоэлементных организационных систем. М.: ИПУ РАН, 2001. – 188 с.
- 71** Новиков Д.А., Цветков А.В. Механизмы функционирования организационных систем с распределенным контролем. М.: ИПУ РАН, 2001. – 118 с.
- 72** Опойцев В.И. Равновесие и устойчивость в моделях коллективного поведения. М.: Наука, 1977. – 248 с.
- 73** Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981. – 206 с.
- 74** Оуэн Г. Теория игр. М.: Мир, 1971. – 230 с.
- 75** Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.

- 76** Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Семина Е.А. Теория игр. М.: Высшая школа, 1998. – 304 с.
- 77** Поппер К. Нищета историзма. М., 1993.
- 78** Почепцов Г.Г. Информационно-психологическая война. М.: Синтег, 2000. – 180 с.
- 79** Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
- 80** Прогностика. Терминология. М., 1990.
- 81** Рабочая книга по прогнозированию / Под ред. И.В. Бестужева-Лады. М., 1982.
- 82** Рефлексивное управление / Сборник статей Международного симпозиума. М.: Институт психологии РАН. 17-19 октября. 2000 г. – 192 с.
- 83** Рефлексивные процессы / спецвыпуск журнала «Прикладная эргономика». 1994. № 1.
- 84** Рефлексивные процессы и управление / Тезисы III Международного симпозиума 8-10 октября 2001 г., М.: ИП РАН, 2001. – 242 с.
- 85** Саймон Г. Науки об искусственном. М.: Мир, 1972. – 147 с.
- 86** Саркисян С.А., Голованов Л.В. Прогнозирование развития больших систем. М.: Статистика, 1975. – 192 с.
- 87** Сидельников Ю.В. Теория и практика экспертного прогнозирования. М.: ИМЭМО РАН, 1990. – 195 с.
- 88** Сластенин В.А., Подымова Л.С. Педагогика: инновационная деятельность. М.: Магистр, 1997. – 224 с.
- 89** Смирнов К.В. Политический анализ. М.: Логос, 2002. – 152 с.
- 90** Советский Энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1988. – 1599 с.
- 91** Сорос Д. Алхимия финансов. М.: ИНФРА-М, 1999. – 416 с.
- 92** Статистическое моделирование и прогнозирование / Под ред. А.Г. Гранберга. М.: Финансы и статистика, 1990. – 383 с.
- 93** Степанов С.Ю., Семенов И.Н. Проблема формирования типов рефлексии в решении творческих задач // Вопросы психологии. 1982. № 1. С. 70 – 74.
- 94** Таран Т. Логические модели рефлексивного выбора // Автоматика и Телемеханика. 2001. № 10. С. 103 – 117.
- 95** Твисс Б. Прогнозирование для технологов и инженеров. М.: 2000. – 255 с.

- 96 Тейл Г. Прикладное экономическое прогнозирование. М.: Прогресс, 1970. – 509 с.
- 97 Тейл Г. Экономические прогнозы и принятие решений. М.: Статистика, 1971. – 488 с.
- 98 Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. М.: Синтег, 1998. – 376 с.
- 99 Тырсигов Д.В. Методика развития интеллектуальной рефлексии у школьников. Ставрополь: ИРО, 1999. – 32 с.
- 100 Тюков А.А. Рефлексия в науке и в обучении. Новосибирск: НГУ, 1984. – 124 с.
- 101 Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. М.: Наука, 1978. – 352 с.
- 102 Фролов С.С. Социология. М.: Гардарики, 2000. – 344 с.
- 103 Цветков А.В. Стимулирование в управлении проектами. М.: Апостроф, 2001. – 144 с.
- 104 Чалдини Р. Психология влияния. СПб.: Питер, 2001. – 288 с.
- 105 Шеманов А.Ю. Самоидентификация на пороге "осевых времен" (к интерпретации модели рефлексии В. Лефевра).
- 106 Шибутани Т. Социальная психология. Ростов-на-Дону: Феникс, 1998. – 544 с.
- 107 Шрейдер Ю.А. Человеческая рефлексия и две системы этического сознания // Вопросы философии. 1990. № 7. С.32 – 42.
- 108 Шо Р.Б. Ключи к доверию в организации. М.: Дело, 2000. – 272 с.
- 109 Щедровицкий Г.П. Принципы и общая схема методологической организации системно-структурных исследований и разработок / Системные исследования. М., 1981. С. 193 – 227.
- 110 Шрейдер Ю.А. Равенство, сходство, порядок. М.: Наука, 1971.–254 с.
- 111 Эйрес Р. Научно-техническое прогнозирование и долгосрочное планирование. М.: Мир, 1971. – 295 с.
- 112 Энджел Д.Ф., Блэкуэлл Р.Д., Мигниард П.У. Поведение потребителей. СПб.: Питер, 1999.– 768 с.
- 113 Fudenberg D., Tirole J. Game theory. Cambridge: MIT Press, 1995.–579 p.
- 114 Howard N. Theory of meta-games / General systems. 1966. № 11. P. 187 – 200.

- 115** Howard N. “General” metagames: an extension of the metagame concept / Game theory as a theory of conflict resolution. Dordrecht: Reidel, 1974. P. 258 – 280.
- 116** Jenkins G.M. Some practical aspects of forecasting in organizations // Journal of forecasting. 1982. Vol. 1. P. 3 – 21.
- 117** Mas-Collel A., Whinston M.D., Green J.R. Microeconomic theory. N.Y.: Oxford Univ. Press, 1995. – 981 p.
- 118** Moore J. Implementation, contracts and renegotiation in environment with complete information / Advances in Economic Theory. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. P. 182 – 281.
- 119** Myerson R.B. Game theory: analysis of conflict. London: Harvard Univ. Press, 1991. – 568 p.
- 120** Novikov D.A. Incentives in multi-agent systems / 2-nd Workshop on Agent-based simulation. Passau, Germany, 2001 (April 2-4). P.134 – 137.
- 121** Novikov D.A. Management of active systems: stability or efficiency // Systems Science. 2001. Vol. 26. N 2. P.85-93.
- 122** Tanaka H. Necessary and sufficient conditions for the existence of a successful forecasting theory / Proceedings of XII International Conference on Systems Science, 1995. Wroclaw.