

Исследование и анализ бизнес-процессов управления, реализуемых в условиях неполной определенности

А.Ю.Ивлев, И.С.Клименко

igor.k41@yandex.ru

АНО ВО «Российский Новый Университет», Москва, Россия

Проведенное в данной работе исследование позволило расширить ранговую шкалу для априорного оценивания выбираемой ЛПР стратегии в части увеличения чувствительности оценивания соотношения осторожность/неосторожность с использованием рисковых, а также классических критериев принятия решения в условиях статистической неопределенности.

Ключевые слова: неопределенность, бизнес-процессы управления, неполная определенность.

Research and analysis of business management processes implemented under conditions of incomplete certainty

A.Yu.Ivlev, I.S.Klimenko

igor.k41@yandex.ru

ANO HE «Russian New University», Moscow, Russia

The study carried out in this work made it possible to expand the rank scale for a priori assessment of the chosen strategy in terms of increasing the sensitivity of assessing the caution / negligence ratio using risky, as well as classical decision-making criteria under conditions of statistical uncertainty.

Keywords: uncertainty, business management processes, incomplete certainty.

Введение

Человечество вступило в эпоху формирования информационного общества, и этот процесс носит необратимый характер. В науке сложилось и активно развивается комплексное научное направление, связанное с проблемой принятия решений в условиях неопределенности и риска. Однако следует признать, что исследование феномена неопределенности еще далеко от завершения.

Ситуацию принятия решения в условиях неопределенности, по мнению И.С. Клименко [1] можно ассоциировать с фундаментальной неупорядоченностью природы, заложенной в нее принципом неопределенности квантовой механики.

Согласно этому принципу у квантовой системы (частицы) отсутствует определенная траектория (копенгагенская интерпретация квантовой механики). Альтернативная трактовка Р.Фейнмана, напротив, предполагает наличие сколь угодно большого количества траекторий, вероятности реализации которых лежат в чрезвычайно широком интервале значений (так называемая сумма по историям).

Подобным же двояким образом можно трактовать ситуацию неопределенности относительно структуры и поведения априори неизвестной наблюдателю (ЛПР) макроскопической системы (объекта познаваемого материального мира). Действительно, познающий субъект может говорить об отсутствии у него какой-либо модели такой системы, но, с другой стороны, это означает, что, в принципе, может быть принято к рассмотрению сколь угодно большое количество альтернативных пробных моделей (гипотез) для описания этой системы.

Развивая эту аналогию, можно утверждать, что априорная сложность познавательной задачи отражает неопределенность относительно искомого полного и точного описания (моделирования) структуры

и поведения исследуемой системы. Для снятия этой неопределенности необходим некоторый (нередко весьма продолжительный) промежуток времени. Дело в том, что генеральное множество альтернативных гипотез должно непременно содержать оптимальную (ключевую) гипотезу, которая нередко длительное время находится «за пределами досягаемости».

Поэтому можно утверждать, что чем меньше промежуток времени исследования, тем больше остаточная неопределенность для ЛПР т.е. тем меньшей точностью будет обладать синтезируемая наблюдателем модель исследуемого объекта. Аналогия с одним из основных соотношений неопределенности Гейзенберга (промежуток времени – точность измерения энергии) нам представляется вполне уместной.

Приведенные аналогии не зависят от природы неопределенности и могут представлять интерес с точки зрения дальнейшего развития теории и методологии принятия решения в условиях риска и неопределенности. Практика применения системного анализа и теории принятия решений демонстрирует широкий круг оптимизационных задач, при решении которых принципиально невозможно одновременно улучшать две неоднородно связанные характеристики системы.

Вопрос о ценности сведений, принимаемых ЛПР в качестве информации для принятия решений, является ключевым как в прагматической теории информации, так и в общей практике управления. Известен критерий А.А. Харкевича [2], согласно которому ценность используемой в процессе принятия решения информации определяется приращением вероятности достижения цели.

Именно вероятностное описание реальности и отражает способ задания неопределенности в природе и обществе. При этом случайность может проявляться в разной степени, которая описывается тем

или иным статистическим законом распределения вероятностей происходящих событий.

Бизнес-процессы управления, играющие важнейшую роль в обеспечении эффективного функционирования социально-экономических систем, неразрывно связаны с принятием решений в условиях неполной определенности и риска. Оптимизация управления состоит в нахождении наилучшего решения среди множества альтернатив в каждом цикле управления, причем, как правило, к числу накладываемых ограничений относится дефицит времени, отводимого на принятие решения.

Этим обстоятельством обусловлена **актуальность исследования**.

1. Процессы управления и неопределенность

1.1. Информация как мера снятия неопределенности

Понятие информации является, безусловно, наиболее сложным из всех, используемых человечеством. Его осмысление еще далеко не завершено и ждет своего развития. Именно поэтому современная наука рассматривает разные подходы к определению и интерпретации феномена информации.

В основу теории информации положен предложенный К. Шенноном [3] метод исчисления количества новой (непредсказуемой) и избыточной (предсказуемой) информации, содержащейся в сообщениях, передаваемых по техническим каналам связи.

Как известно, для исчисления количества информации, содержащейся в дискретных сообщениях, К. Шеннон предложил использовать вероятностную функцию *энтропии*, заимствованную из статистической термодинамики. Следует отметить, что сначала и сам К. Шеннон, и многие его последователи были склонны рассматривать такое заимствование всего лишь как удобный формальный прием. Однако вопреки мнению самого К. Шеннона, сначала предостерегавшего против распространения его метода за пределы прикладных задач теории связи, этот метод оказался настолько универсальным, что его применение вышло далеко за эти пределы.

Оказалось, что существует весьма глубокая взаимосвязь между информацией и физической (термодинамической) энтропией. Ключом к новому пониманию феномена информации послужила установленная Л. Бриллюэном содержательная связь между информационной и физической энтропией. Предложенный Л. Бриллюэном [4] *негентропийный принцип* теории информации (информация есть отрицательная энтропия) позволил дать новую научную интерпретацию информации как меры *структурной упорядоченности систем* произвольной природы. Появилась возможность ввести меру для измерения смысла информации.

В статистической физике энтропия выступает в качестве меры достижения макросистемой состояния термодинамического равновесия, при котором характеристики молекул вещества максимально (с

точностью до флуктуаций) приближаются к *равновесным*, а сама энтропия стремится к максимальному значению.

Однако мы видим, что с помощью той же самой вероятностной функции энтропии можно исследовать, например, такие упорядоченные структуры, как письменные тексты. Количество информации I , вычисляемое по известной формуле Хартли [5], соответствует снятию неопределенности H при получении сообщения об одной из букв алфавита в предположении о равенстве вероятностей появления любой из них.

В реальных текстах появлению разных букв соответствуют разные вероятности, и реальная энтропия оказывается меньше. Разность между значениями максимальной H_{max} и реальной энтропии H_p определяет количество предсказуемой (избыточной) информации I_n :

$$I_n = H_{max} - H_p. \quad (1.1)$$

Избыточность *осмысленного текста* обусловлена действием грамматических и фонетических правил, которые предполагаются известными получателю сообщения. Этими правилами задается присущая тексту структурная упорядоченность, поэтому количество избыточной информации, вычисляемое по формуле (1.1), одновременно определяет количество информации, сохраняемой в упорядоченных структурах осмысленного текста (как, впрочем, и в других структурированных системах):

В практических задачах техники связи учет реальных значений вероятностей появления букв и их сочетаний при передаче письменных текстов позволяет уменьшить избыточность передаваемых сообщений. С другой стороны, с увеличением избыточности растет степень упорядоченности (предсказуемости) текста. В предельном случае полностью детерминированной передачи символов текста она выродится в повторение одних и тех же букв.

Общеизвестно, что теория информации возникла для объяснения процессов обмена сообщениями в ходе целенаправленной деятельности человека. В большинстве ее практических задач рассматриваются понятия передатчика (источника), приемника (получателя), сигнала, сообщения, а также событий и их вероятностей. Понятие информации в рамках прагматической теории информации вводится следующим образом: *информация – мера снятия неопределенности для достижения цели*.

Упорядочим многочисленные понятия, связанные с феноменом информации и используемые зачастую для взаимных определений, а также ограничим области их применения следующим образом:

1. *Сигнал* – материальный носитель *сообщения*.
2. *Сообщение* – ограниченная совокупность *сведений*.
3. *Сведения* – *данные* и/или *знания* из определенной предметной области.
4. *Данные* – сведения, отображающие отдельные факты, характеризующие объекты и процессы конкретной предметной области.
5. *Знания* – сведения, представляющие собой

устойчивые закономерности предметной области, полученные в результате познавательной и практической деятельности, а также накопления профессионального опыта.

Базовое разграничение данных и знаний определяем следующим образом. Данные, в основном, представляют собой *ментальные модели*, которые используются людьми для принятия текущих решений в каждодневной деятельности, знания же – для формирования *научно обоснованных моделей*, в исследовательской деятельности, инженерии, обучении и управлении, в том числе, при выборе ответственных управленческих решений.

Соответственно введем следующие определения.

Определение 1: данные – это отдельные факты, фиксируемые как результат наблюдений и измерений, и характеризующие свойства объектов и процессов конкретной предметной области.

Определение 2: знания – это закономерности предметной области, полученные в качестве обобщенного результата практической деятельности и профессионального опыта, позволяющие их обладателю ставить и решать практические задачи в предметной области.

Понятие *информационного объекта* используется в качестве обобщенного наименования перечисленных выше понятий. Тогда любое преобразование информационного объекта следует считать *информационным процессом*. В литературе принято подразделять множество информационных процессов на подмножества процессов рутинного, обменного и семантического преобразования сообщений [6].

1.2. Информация как продукт субъективной интерпретации сообщений

Подчеркнем, что процесс, называемый *информационным обменом*, строго говоря, целесообразно считать *обменом сообщениями*. Дело в том, что сообщения, в принципе, могут нести не только информацию, но также *информационный шум* и *дизинформацию* [7]. К тому же, при обмене сообщениями получаемая приемником (субъектом) информация является функцией не только сообщения, но и степени согласованности тезаурусов передатчика и приемника.

Последнее означает, что процессы декодирования сообщения и его интерпретации приемником существенным образом влияют на степень снятия неопределенности, как меру количества информации, а также и ее *ценности*.

При таком подходе целесообразно ряд свойств (характеристик), традиционно приписываемых информации, считать свойствами сообщений, точнее, сведений, которые они содержат. Перечислим основные характеристики сообщений:

- 1) достоверность;
- 2) полнота;
- 3) точность;
- 4) актуальность;
- 5) своевременность;
- 6) объективность;
- 7) адекватность и другие.

Отметим, что согласованного, строгого и однозначного терминологического разграничения смысла этих понятий в научной литературе не обнаруживается. В обыденном же языке некоторые из них используются как синонимы (например, полнота и точность или достоверность и адекватность), другие выглядят близкими по смыслу, что нередко приводит к искажению смысла сообщений при их интерпретации.

Что же касается собственно информации, то ее фундаментальными свойствами принято считать:

- смысл (семантику);
- ценность (полезность).

Тогда можно полагать, что характеристики сообщений относятся к атрибутивным свойствам информации, которую извлекает из сообщений тот или иной индивид (субъект). В совокупности они определяют количество, смысл и ценность информации, извлекаемой из сообщения.

Поэтому закономерным развитием статистической теории информации К. Шеннона оказалась разработка семантического и прагматического [8] подходов к выявлению и определению качественных характеристик информационных объектов.

Качество решений зависит от квалификации и опыта ЛПР, от устойчивости ЛПР к факторам внешнего воздействия, от его умения принимать решение в условиях ограничения времени на принятие решения. ЛПР принимает решение, руководствуясь полученными из объекта управления (ОУ) сообщениями, в которых, в общем случае содержится не только информация, но также информационный шум и дезинформация. Таким образом, особое значение для ЛПР приобретает наличие критерия ценности информации, извлеченной им из сообщений, принимаемых из ОУ относительно его состояния. Следует подчеркнуть, что степень ценности информации, извлекаемой из получаемых сообщений, определяется совокупностью их существенных свойств, в том числе синтаксисом (содержанием) и семантикой (смыслом).

Вопрос о ценности сведений, принимаемых ЛПР в качестве информации для принятия решений, является ключевым как в прагматической теории информации, так и в общей практике управления. Хорошо известен сформулированный А.А. Харкевичем критерий [2], согласно которому ценность используемой в процессе принятия решения информации определяется приращением вероятности достижения цели:

$$I_{ц} = \log P_1 - \log P_0 = \log (P_1/P_0), \quad (1.2)$$

где P_0 – априорная вероятность достижения цели, P_1 – апостериорная вероятность достижения цели. При этом, как известно, возможны три ситуации ($P_1 > P_0$; $P_1 < P_0$ и $P_1 = P_0$).

Этот критерий по существу отделяет информацию (ценные сведения) от информационного шума (сведения с нулевой ценностью) и дезинформации (сведения с отрицательной ценностью). В то же время критерий А.Харкевича подчеркивает наличие терминологического и содержательного *противоречия*, обусловленного устоявшейся традицией считать информацией *любые сведения*, циркулирующие

в обществе. Дело в том, что, принимая определение информации как меры снятия неопределенности для достижения цели, мы тем самым де-факто *выводим дезинформацию и информационный шум в отдельные самостоятельные категории информационных объектов*.

Таким образом, отталкиваясь от базовых положений теории информации, мы акцентируем внимание на *субъективной* природе неопределенности, обусловленную закономерным протеканием процессов возрастания информационной энтропии.

Другая – объективная природа неопределенности обусловлена протеканием процессов, связанных с физической (термодинамической) энтропии, характеризующей априорную неопределенность объектов исследования, ту самую неопределенность, которую ЛПР старается снять посредством выдвижения и последующей отбраковки пробных моделей – гипотез.

1.3. Природа и причины неопределенности

Неопределенностью принято считать неполное или неточное представление о значениях различных параметров систем в будущем, порождаемых различными причинами и, прежде всего, неполнотой или неточностью знаний ЛПР об условиях реализации принимаемого решения, в том числе, о связанных с ним затратах и результатах.

Здесь следует различать источники неопределенности. Во-первых, выделим неопределенность, вызываемую недостатком информации. Именно эту составляющую глобальной неопределенности К. Эрроу [9] считает единственной и полагает, что полная информация о рыночных процессах и ценообразующих факторах целиком компенсирует неопределенность. Тем самым он отстаивает позицию полного детерминизма в отношении таких процессов.

С другой стороны, реальные процессы протекают в пределах конечного жизненного цикла систем, что накладывает ограничение на возможность нахождения информации, необходимой для получения полных и точных знаний относительно этих процессов. К тому же стремление к построению как можно более точных моделей неизбежно оборачивается нарастанием их сложности, требующей все более значительных затрат времени, а также интеллектуальных, вычислительных и других ресурсов. А ограничения, как известно существуют всегда.

Кроме того, необходимо учитывать также неопределенность, вызванную неадекватной обработкой и интерпретацией (истолкованием) полученных, пусть даже вполне достоверных сведений. Этот тип неопределенности связан с семантикой конкретных информационных объектов. В свою очередь, наличие такой неопределенности обуславливает введение в рассмотрение новой категории – «избыточная информация», которая находится в непосредственной связи с категорией неопределенности.

В литературе, наряду с понятием неопределенности широко используется понятие случайности,

которое принято считать частным случаем неопределенности, т.е. понятием меньшей степени общности.

Существует несколько подходов к определению природы случайности и неопределенности. Первый из них отражает воззрения П.С. Лапласа, основоположника концепции классического детерминизма. По его мнению, случайность не присуща самим объектам и процессам, а только отражает неполноту и неточность наших знаний, которые, в принципе, устранимы. Сторонники такого подхода определяют случайность как вид неопределенности, которая, тем не менее, подчиняется строгой закономерности, выражаемой распределением вероятности событий.

Отметим, что одним из следствий такого подхода является удобное в практическом смысле разделение понятий случайности и неопределенности, согласно которому понятию случайности соответствует случай равномерного распределения измеряемых величин, или, иными словами, отсутствие закона распределения. Тогда любое из множества известных статистических распределений будет отражать ситуацию неопределенности. Отметим, что в реальности среди таких распределений естественным образом выделяется нормальное распределение случайных величин, отражающее широкий круг недетерминированных природных процессов.

Другая, по сути, противоположная точка зрения основана на рассмотрении случайности как объективного свойства материи, а детерминизма – как некоторого предельного случая проявления случайности. Такая точка зрения обусловлена появлением и развитием квантовой физики, достоверно установившей *принципиальную* невозможность получения *детерминированных* данных о поведении объектов микромира. Как известно, это научное положение отражает принцип неопределенности Гейзенберга.

Естественно, существует и промежуточная позиция, согласно которой в мире происходят как детерминированные (однозначно предсказуемые), так и случайные процессы. При этом случайность может проявляться в разной степени, которая описывается тем или иным статистическим законом распределения вероятностей происходящих событий.

Следует, впрочем, заметить, что различия приведенных подходов, никоим образом не проявляются в ходе проведения статистических измерений и обработки их результатов. В реальных практических условиях проявление объективных, и субъективных факторов неопределенности не вносит изменений в методологию и результаты измерений.

С позиций исследования неопределенности способности ее задания могут быть различными. Во многих случаях она задается набором альтернатив с соответствующими вероятностями, и тогда количество информации может быть измерено на основе энтропийных оценок. В случае задания интервальной неопределенности, когда параметры, отражающие состояние обстановки, определены в возможном интервале их значений (или в виде множества возможных значений в пространстве состояний обстановки), наряду с оцениванием количества энтропии может применяться так называемый маржиналистский подход

[10].

Если же неопределенность задается другим способом, то количество получаемой информации придется измерять по-другому. Пожалуй, наиболее важным, особенно в связи с интенсивным развитием информационных технологий, является алгоритмический подход, обоснованный А. Н. Колмогоровым.

Если энтропия скорее физический термин, то информация – по своему смыслу может быть признана философской категорией. В частности, как отмечает А. Н. Колмогоров, "информация по своей природе не специально вероятностное понятие" [11]. Выдающийся российский математик вводит способ определения количества информации с помощью алгоритмического подхода. Особенность алгоритмического подхода в теории информации заключается в том, что информация выступает в форме отношения между множествами.

Количество ее определяется как минимальная длина программы, однозначно преобразующая одно множество в другое. Работу алгоритма можно рассматривать как процесс снятия неопределенности. При этом, неопределенность может быть представлена множеством альтернатив (допустимым множеством) в виде набора возможных решений. В целом же следует признать, что существуют задачи, где алгоритмический подход к измерению количества информации обладает рядом преимуществ перед энтропийным подходом, во всяком случае, в области современных теорий управления, где он хорошо отражает особенности постановки управленческих задач.

1.4. Системный анализ как методология снятия неопределенности

Системный анализ представляет собой совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений при разрешении самых разнообразных проблем современной реальности. Общим признаком всех проблем, для решения которых привлекается методология системного анализа, независимо от области, где они возникают, является именно их сложность, которая и порождает неопределенность для ЛПР. Сложность проблемы обусловлена необходимостью выбора решения на множестве альтернатив в условиях неопределенности (недостатка информации) и дефицита времени на ее получение. По своей сути проблема отражает существование того или иного противоречия между имеющимся и желаемым состояниями, а разрешение противоречия означает снятие неопределенности [12].

Общеизвестно, что средством разрешения противоречий в методологии науки является выдвижение гипотез (пробных моделей), их логическая и эмпирическая проверка. История науки зафиксировала множество ситуаций, когда гипотезы, позволившие успешно разрешить крупные проблемы естествознания, удавалось найти через годы и десятилетия после их возникновения. Достаточно вспомнить, например, построение релятивистской механики и

теории фотоэффекта. В первом случае от появления противоречия между теоретическими положениями электродинамики Максвелла и эмпирической базой механики Галилея – Ньютона до его разрешения прошло более 30 лет, во втором – потребовалось около 20 лет, чтобы найти объяснение природы фотоэффекта на базе квантовой гипотезы.

Эти примеры убедительно показывают, что частую гипотеза, оказавшаяся продуктивной, по тем или иным причинам поначалу не фигурирует среди рассматриваемых вариантов (альтернатив). В системном анализе подобные обстоятельства учитываются специально разработанными алгоритмами генерации исходного множества альтернатив и «отбраковки» из него бесперспективных альтернатив.

Тем не менее, нельзя говорить о существовании универсальной методики системного анализа в силу разнообразия сложных систем и возможных альтернативных моделей для их отображения. Поэтому системный анализ представляет собой систему логически связанных теоретических и эмпирических положений, почерпнутых из естественных наук, математики и опыта разработки сложных технических систем. Однако далеко не последнюю роль при проведении системного анализа играет интуиция и опыт исследователя.

Недаром считается, что системный анализ, особенно в части математического моделирования, является собой своеобразное искусство. Накопленный опыт построения удачных моделей сложных систем позволил сформулировать принципы системного анализа – положения общего характера, задающие направление системного исследования и требования, которым должна отвечать правильно построенная модель. Другими словами, для всего разнообразия методик системного анализа основой является соблюдение этих принципов.

Общепринятых названий и формулировок принципов системного анализа пока нет, поэтому различные авторы излагают их по-разному, однако при этом разные формулировки касаются одних и тех же понятий.

Рассмотрим последовательно эти принципы.

1. *Принцип конечной цели* определяет приоритет конечной цели анализа и синтеза сложных систем. Согласно этому принципу, в первую очередь, необходимо четко сформулировать цель исследования. Расплывчатость цели, как правило, влечет за собой неверные выводы. Уяснение назначения системы, ее функций позволяет выделить ее существенные характеристики, показатели и критерии качества и эффективности.

Далее, при синтезе систем любые вносимые изменения следует оценивать относительно того, насколько они способствуют достижению конечной цели. При этом необходимо учитывать, что достижение конечной цели системы должно в полной мере отвечать цели «старшей» системы, компонентом которой является исследуемая (синтезируемая) система.

2. *Принцип подчиненности* (измерения) утверждает, что о качестве системы и эффективности ее

функционирования следует судить с точки зрения целей и задач системы более высокого уровня.

3. *Принцип эквифинальности* задает устойчивость системы по отношению к начальным и граничным условиям. Согласно этому принципу, система при различных начальных условиях должна достигнуть заданного конечного состояния различными путями независимо от времени.

4. *Принцип единства* требует одновременного рассмотрения системы как целого и как совокупности взаимодействующих элементов, сочетания процедур анализа системы и синтеза ее целостной модели.

5. *Принцип эмерджентности* (целостности) подчеркивает несводимость свойств системы к сумме свойств ее элементов и невыводимость свойств целого из свойств его составных элементов.

6. *Принцип связности* ориентирует на рассмотрение любой части системы совместно с ее окружением с выявлением связей (отношений) между элементами и взаимодействия с внешней средой.

7. *Принцип функциональности* указывает на необходимость совместного рассмотрения структуры системы и ее функции с обязательным приоритетом функции над структурой. Это, в частности, означает, что, придавая системе новые функции, полезно пересмотреть ее структуру, по сути, синтезировать новую систему, поскольку попытки навязать новые функции старой схеме, как правило, оказываются неэффективными.

8. *Принцип неопределенности* концентрирует внимание на необходимости учета случайных явлений в открытых динамических системах. Неопределенность в предвидении внешних воздействий и флуктуаций в самой системе можно минимизировать, определяя вероятностные значения выходных характеристик (если известен закон распределения вероятностей случайных воздействий), либо ориентироваться на равновероятные события.

9. *Принцип развития* (эволюции) закладывает в рассмотрение учет адаптации, самоорганизации, изменения структуры и расширения функций системы. Синтезируемая система должна располагать возможностью развития, наращивания, усовершенствования, совместимости с новыми подсистемами. Кроме того, этот принцип ориентирует на изучение предыстории развития системы (генетический анализ) и появляющихся тенденций.

Перечисленные принципы, а также некоторые другие, играющие, на наш взгляд, вспомогательную роль, обладают, конечно же, весьма высоким уровнем общности. Поэтому при практическом применении необходимо их конкретизировать применительно к задачам исследования. При этом некоторые принципы могут оказаться несущественными. Тем не менее, опираясь на всю совокупность принципов системного анализа, особенно на начальной стадии исследования, можно избежать многих заблуждений и ошибочных решений.

1.5. Структура системного исследования

Исторически исследование сложных систем ассоциировалось с проведением их разложения на элементы с тем, чтобы установить действующий в них закон функционирования (поведения). Поэтому утвердился термин «системный анализ», интегрирующий процедуры, как *анализа*, так и *синтеза* структуры систем. В дальнейшем у многих авторов добавилась еще предшествующая анализу процедура декомпозиции, т.е. расчленения системы на элементы. С другой стороны, ряд авторов включает декомпозицию в состав анализа. Подобные разночтения, как уже отмечалось, достаточно характерны для относительно нового и активно развивающегося междисциплинарного направления исследований современной науки.

Представляется целесообразным использовать понятие (и термин) «системное исследование», включающее следующую последовательность выполняемых процедур:

- декомпозиция,
- анализ,
- синтез,
- агрегирование.

При этом задачей декомпозиции является определение элементного состава, структуры и *закона функционирования (поведения)* исследуемой системы, задачей анализа – выявление реально действующего в системе *механизма (алгоритма) функционирования*, единственным образом выполняющего установленный в ходе декомпозиции закон функционирования. Как правило, выполнение процедур декомпозиции и анализа позволяет выявить имеющееся (возникшее) в системе противоречие, составляющее практическую проблему.

В качестве средства решения проблемы (разрешения противоречия) выступают процедуры синтеза и агрегирования. Задача синтеза состоит в выборе оптимального (наилучшего при существующих условиях и ограничениях) механизма функционирования (для технических систем) или алгоритма функционирования (для организационных либо организационно-технических систем). Завершает системное исследование процедура агрегирования, задача которого сводится к формированию конкретной структуры синтезируемой (новой) системы, обладающей новыми эмерджентными свойствами и свободной от ранее выявленной проблемы.

Результат объединения компонентов в единое целое принято называть *агрегатом*. С точки зрения системного анализа агрегат – это система, обладающая внешней и внутренней целостностью. Ключевая задача агрегирования является формирование действующей структуры системы. Таким образом, с синтезом связано понятие *формальной структуры*, а с агрегированием – понятие *материальной структуры*.

В общем случае под формальной структурой понимается совокупность функциональных элементов и их отношений, необходимых и достаточных для достижения системой целевого эффекта. Материальная же структура является носителем конкретных типов элементов (с определенными значениями

параметров) и способов их взаимодействия. Еще раз отметим, что некоторой фиксированной цели соответствует, как правило, одна и только одна формальная структура в то время, как одной формальной структуре может соответствовать множество материальных структур.

Поэтому при проведении системного исследования аналитикам приходится отвечать на следующие вопросы:

- соответствуют ли действующий в системе алгоритм (механизм) функционирования и существующая структура основным целям системы;
- требуется ли реорганизовать существующую структуру, не изменяя алгоритм функционирования либо необходимо синтезировать и агрегировать принципиально новую систему;
- какой выбрать новый алгоритм функционирования для синтезируемой системы, и каким образом перераспределить функции системы по элементам агрегируемой структуры.

Основные задачи системного исследования могут быть детализированы в виде последовательности функций, выполняемых на каждом этапе.

На этапе *декомпозиции* для формирования общего представления системы выполняются:

1. Определение общей цели исследования и ее декомпозиция в виде дерева целей, а также уточнение основной функции системы путем ограничения ее траектории в пространстве состояний и в параметрическом пространстве.
2. Выделение системы из окружающей среды (разделение пространства состояний на систему и надсистему) по признакам вклада системы в достижение целей надсистемы.
3. Описание воздействующих факторов, т.е. управляемых и неуправляемых воздействий, изменяющих состояние системы.
4. Описание тенденций развития проблемной ситуации и источников неопределенности - как в самой системе, так и в окружающей среде.
5. Описание системы как «черного ящика», с установлением закона ее функционирования в виде зависимости выходных сигналов от управляемых и неуправляемых воздействий и времени.
6. Функциональная, компонентная (по виду элементов) и структурная (по виду отношений между элементами) декомпозиция системы.

Последняя шестая функция, по существу, составляет переходный процесс между декомпозицией и анализом. Проблема осуществления декомпозиции состоит, как уже отмечалось в том, что в сложных системах в принципе отсутствует однозначное соответствие между законами функционирования подсистем и реализующими их алгоритмами (механизмами). Поэтому в практике системных исследований система отображается в виде иерархической структуры с ограниченной глубиной декомпозиции.

Если при декомпозиции выясняется, что модель элемента начинает описывать внутренний алгоритм его функционирования вместо закона его поведения как «черного ящика», то это означает выход за пре-

делы цели декомпозиции и, следовательно, сигнализирует о необходимости прекращения декомпозиции.

Уточним основные стратегии декомпозиции.

При *функциональной декомпозиции* основанием для разбиения системы на функциональные подсистемы является общность функций, выполняемых группами элементов. При этом ищется ответ на вопрос – *что* делает система, независимо от того, *как* она это делает.

Структурная декомпозиция в качестве признака выделения подсистем рассматривает наличие сильной связи между элементами по определенному типу отношений между ними (информационные, иерархические, логические и другие связи).

Декомпозиция по жизненному циклу проводится в случаях, когда на разных этапах цикла существования системы изменяются законы функционирования ее подсистем.

Декомпозиция по физическому процессу основана на выделении подсистем по конкретному способу выполнения механизмов функционирования и направлена на обеспечение проведения в дальнейшем параметрического анализа системы.

Перейдем к этапу *анализа*, обеспечивающего формирование детального отображения системы. На этом этапе осуществляются следующие процедуры:

1. Структурный (морфологический) анализ существующей системы. Он включает уточнение состава компонентов (элементов и подсистем), выявление и анализ взаимосвязей компонентов, анализ целостности системы, разделение управляемых и неуправляемых характеристик.
2. Функциональный анализ, в ходе которого уточняется закон функционирования системы, определяется степень взаимного содействия (или взаимного противодействия) подсистем, задается пространство состояний системы и параметрическое пространство, в котором происходит смена ее состояний, отбирается наиболее достоверная гипотеза (гипотезы) относительно алгоритма или механизма функционирования системы.

3. Информационный анализ, целью которого является установление действующего в системе алгоритма управления процессом функционирования. Он включает анализ организации процессов принятия и доведения управленческих решений, контроля и учета состояний системы, установление причин несоответствия реальных состояний системы требуемым состояниям, анализ процессов планирования, прогнозирования и координации действий функциональных подсистем в соответствии с основными целями системы.

4. Генетический анализ, направленный на исследование предыстории системы, причин появления проблемной ситуации, существующих тенденций развития ситуации, построение краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов.

5. Анализ аналогов, в ходе которого проводится сравнительное оценивание известных и предполагаемых способов реализации требуемого закона функ-

ционирования, т.е. альтернативных алгоритмов (механизмов) функционирования.

6. Анализ эффективности системы по показателям результативности, оперативности и ресурсоемкости, предполагающий выбор шкал измерения показателей, обоснование и формирование критериев эффективности, непосредственное оценивание и анализ полученных оценок.

7. Параметрический анализ – формирование количественных требований к системе, создаваемой с целью снятия проблемной ситуации.

Далее следует этап *синтеза* системы, решающей проблему. На этом этапе осуществляются:

1. Разработка модели требуемой системы, включающая построение концептуальной модели, выбор математического аппарата, моделирование, оценивание модели по критериям адекватности, простоты, оптимизации соотношения сложность/точность и т.д.

2. Синтез альтернативных формальных структур, обеспечивающих снятие проблемы на качественном уровне оценивания.

3. Сравнительное оценивание альтернативных вариантов синтезируемой физической структуры, в том числе обоснование схемы и процедуры оценивания, формирование обобщенных показателей качества и эффективности, собственно оценивание, обработка и анализ результатов оценивания, выбор оптимального варианта.

Наконец, этап *агрегирования* обеспечивает синтез параметров системы, снимающей проблему. Речь идет о реализации конкретной физической структуры, выполняющей требуемый закон функционирования с заданными значениями существенных параметров.

1.6. Целеполагание в системном анализе

Предметом системного анализа являются сложные целенаправленные системы с управлением. Поэтому первоочередное значение в системном анализе имеет определение совокупности целей системы, формирование на этой основе множества частных задач, направленных на достижение цели, а также оценивание степени достижения промежуточных целей (подцелей).

Определим основные понятия, используемые при реализации целевого подхода.

Цель – желаемый результат (исход) функционирования или развития системы, достижимый в пределах определенного промежутка времени. Цель рассматривается как более общая категория по сравнению с *задачей*, поскольку предполагается, что цель может быть достигнута в результате решения задач, упорядоченных по отношению к цели.

Направление развития – последовательность выполняемых и задаваемых целей, представляющихся все более совершенными.

Идеал – наиболее совершенный результат развития, достижимый *асимптотически* и в общем случае зависящий от времени.

Создание целенаправленной системы с необходи-

мостью требует определить направление (концепцию) ее развития, т.е. осуществить целеполагание. Все искусственные системы (как материальные, так и абстрактные) создаются для достижения определенных целей. В зависимости от назначения и степени познания исследуемой системы в понятие «цель» вкладывается различный смысл – от идеальных устремлений до директивного задания конкретных значений параметров, которые требуется достичь за установленный интервал времени при ограниченных ресурсах.

Системы, для которых цель изначально или по мере ее уточнения может быть задана набором параметров, принято называть *целесоориентированными*. Если же параметризовать желаемое будущее оказывается невозможным, т.е. цель системы не поддается строгому описанию, то тенденции ее развития связывают с категорией *ценности*. Системы такого рода относятся к *ценностно-ориентированным*. В отличие от целесоориентированных систем в них существенным является сам процесс движения, оцениваемый, как правило, по неколичественным критериям.

Примером таких систем могут служить творческие коллективы, занимающиеся фундаментальными научными исследованиями или работающими в различных областях искусства.

Итак, формирование цели зависит от глубины познания системы, и по мере продвижения к цели представление о ней может неоднократно уточняться и конкретизироваться. Цель можно считать *моделью будущего*, которая в ходе движения к ней становится все более точной, а значит, и более детализированной.

Реализация движения системы к цели обеспечивается посредством соответствующего управления, которое представляет собой определенное принуждение, призванное корректировать ее возможное естественное развитие, определяемое начальными условиями и процессами взаимодействия с окружающей средой.

Процесс целеполагания состоит в формулировании требований, которым должно соответствовать окончание управляемого периода в виде конкретных значений параметров состояния. Каждый такой параметр, естественно, имеет свою область определения, которая представляет собой некоторый диапазон значений на соответствующей координате фазового пространства. Поэтому цель, включающая несколько совместно задаваемых требований, в многомерном фазовом пространстве выглядит как пересечение областей (поверхностей), каждая из которых содержит множество параметров состояния, удовлетворяющих выполнению одного требования.

Очевидно, однако, что формирование такой цели, соответствующей многим требованиям к конечному состоянию системы, связано с возникновением существенных трудностей. Выдвижение значительного количества требований чревато тем, что в фазовом пространстве они не будут иметь не только области, но и точки пересечения, т.е. окажутся несовместимыми.

Следовательно, число конструктивных требований, интегрирующих цель системы, не должно превышать число параметров ее состояния (степеней свободы).

Для фиксации цели как конечного состояния системы весьма информативным является понятие «*область достижимости*», под которым понимается множество предельных (оптимальных) значений задаваемых и контролируемых параметров. Иными словами, область достижимости включает множество состояний системы, достигаемое при наилучшем управлении. Здесь просматривается очевидная аналогия с обеспечением выполнения *критерия превосходства* при оценивании качества систем (см. [13]).

Определение области достижимости представляет собой одну из сложнейших процедур системного анализа. Для ее успешного проведения необходимо построить множество траекторий развития существенных параметров системы на интервале времени от начала управления до его завершения при условии оптимального управления.

Достаточно сложным является также процедура установления *факта достижения цели*. В реальных условиях, как правило, имеет место отклонение от точного выполнения заданных требований к конечному состоянию системы. Вследствие неадекватной идентификации текущих состояний системы и несоответствия им управляющих воздействий траектория развития системы может не попасть в целевую область. В таком случае систему следует нацелить на выполнение другой задачи, поскольку независимо от последующих управляющих воздействий система будет отдаляться от первоначальной цели.

Особенно важно это в ситуациях, когда достижение конечной (глобальной) цели обеспечивается выполнением ряда последовательных задач. Дело в том, что после выполнения каждой из них требуется определенная структурная или организационная перестройка системы, задействуются новые ресурсы. Несвоевременная перестройка системы приводит к потере темпа развития, нерациональному расходу ресурсов, а в худшем случае может привести к распаду системы.

Это обстоятельство следует неизменно принимать во внимание во всех областях деятельности, где существует иерархическая преемственность в разрешении сложных структурированных проблем.

1.7. Системное исследование процесса управления в условиях неполной определенности

Современное общество характеризуется высочайшей интенсивностью процессов обмена сообщениями. Только в России аудитория интернет-пользователей сегодня составляет почти 100 млн. человек. Прирост интернет-аудитории происходит за счет все более активного использования мобильных устройств.

В корпоративной среде набирает обороты новая инфраструктурная модель – корпоративная мобиль-

ность (Enterprise Mobility). Она дает возможность сотрудникам предприятий получить повсеместный и безопасный доступ к корпоративным информационным ресурсам и Интернету с мобильных устройств. Ключевой услугой при этом остается обмен сообщениями разных типов: SMS, MMS, E-mail, IM. Сервис сообщений востребован, о чем свидетельствует положительная динамика доходов и трафика во всем мире.

Однако сегодня все более очевидной становится тенденция к росту объема циркулирующих в обществе недостоверных сообщений. К тому же многие из сообщений оказываются неактуальными и/или несвоевременными для большинства их потенциальных потребителей.

В этой связи проведем системного анализа информационных (телекоммуникационных) процессов с точки зрения лица, принимающего решение (ЛПР), стремящегося использовать актуальные и своевременные сообщения для принятия решения в условиях неполной определенности.

Будем рассматривать любой объект или процесс как систему – упорядоченное множество элементов. При этом понятие системы будет обладать более высокой степенью общности по отношению к процессу, который представляет собой упорядоченное во времени множество событий. Заметим, однако, что во многих случаях процесс целесообразно рассматривать как некую функцию непрерывной переменной, что обеспечивает удобство его математического моделирования.

Будем, придерживаясь прагматической (аксиологической) теории информации, рассматривать информацию как меру снятия неопределенности для достижения цели. Такое определение позволяет абстрагироваться от синтаксического подхода к оцениванию количества информации, концентрируя внимание на выявлении *семантики* сведений, составляющих структуру сообщения, а также установления *ценности* этих сведений с точки зрения принятия решения об их *использовании по назначению*.

Очевидно, что в общем случае разные индивиды, потенциально выступающие в роли ЛПР, по-разному декодируют и интерпретируют одно и то же сообщение, что приводит к принятию различных решений относительно целесообразности использования по назначению сведений, которые это сообщение содержит.

В принципе, практически любое сообщение конечного объема, переданное на естественном или формализованном языке и принятое без искажений в канале связи, содержит некоторую *остаточную неопределенность*. Иными словами, принятое сообщение содержит в определенных соотношениях:

- информацию (достоверные сведения);
- информационный шум (исходную неопределенность сообщения, не декодируемые и тривиальные сведения);
- дезинформацию (умышленно и/или неумышленно внесенные недостоверные сведения).

Рассмотрим цикл процесса управления, в котором ЛПР получает исходящее из объекта управления

(ОУ) сообщение о его состоянии, принимает на его основе решение и направляет к объекту управления, сообщение, несущее управляющее воздействие (командное сообщение).

Общая структурная схема системы с управлением представлена на рис.1.

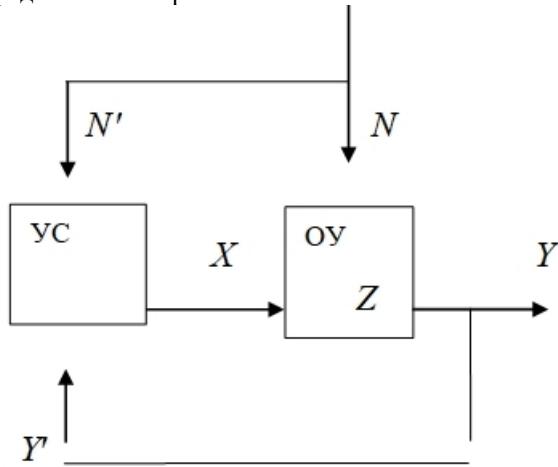


Рис. 1. Общая структурная схема системы с управлением: УС – управляющая система, ОУ – объект управления, X – множество управляемых воздействий; N – множество неуправляемых (внешних) воздействий; Z – множество внутренних состояний ОУ; Y – множество выходов ОУ; Y' – подмножество выходов, известных в УС; N' – подмножество неуправляемых воздействий, известных в УС

Пусть из управляющей системы поступает в объект управления сообщение, несущее управляющее воздействие.

Формально исходящее сообщение представим в виде [7]:

$$S_{исх} = K_u \cup K_{ш} \cup K_{д}, \quad (1.3)$$

где $S_{исх}$ – полный состав исходящего сообщения, K_u – информационный компонент, $K_{ш}$ – шумовой компонент, $K_{д}$ – дезинформационный компонент.

В процессе декодирования и интерпретации принятого сообщения в него, в принципе, вносится со стороны ЛПР дополнительная неопределенность, обусловленная:

- неадекватным декодированием содержания сообщения;
- ошибочной или неточной интерпретацией (искажением) смысла (семантики) декодированного сообщения.

Тогда принятое сообщение:

$$S_{пр} = K_u^* \cup K_{ш}^* \cup K_{д}^*, \quad (1.4)$$

где $S_{пр}$ – полный состав принятого сообщения в результате его декодирования и интерпретации, K_u^* – адекватно зафиксированный ЛПР информационный компонент, $K_{ш}^*$ – результирующий шумовой компонент, $K_{д}^*$ – результирующий дезинформационный компонент.

В общем случае результирующий шумовой компонент имеет вид:

$$K_{ш}^* = K_{ш} \cup K_{ш}^{дек} \cup K_{ш}^{инт} \quad (1.5)$$

где $K_{ш}^{дек}$ и $K_{ш}^{инт}$ – шумовые компоненты, внесенные ЛПР приемника вследствие неадекватного декодирования сообщения и неточной интерпретации его семантики соответственно.

В свою очередь результирующий дезинформационный компонент

$$K_{д}^* = K_{д} \cup K_{д}^{дек} \cup K_{д}^{инт} \quad (1.6)$$

где $K_{д}^{дек}$ и $K_{д}^{инт}$ – дезинформационные компоненты, внесенные ЛПР приемника вследствие ошибочного декодирования сообщения и искажающей интерпретации его семантики соответственно.

Тогда состав принятого ЛПР сообщение после его декодирования и интерпретации может быть представлен в виде:

$$S_{пр} = K_u^* \cup (K_{ш} \cup K_{ш}^{дек} \cup K_{ш}^{инт}) \cup (K_{д} \cup K_{д}^{дек} \cup K_{д}^{инт}). \quad (1.7)$$

Очевидно, что в общем случае $K_u \geq K_u^*$, т.е. в силу возрастания шумовой и дезинформационной составляющих ЛПР в лучшем случае может лишь не ухудшить условия адекватного принятия решения.

В реальной практике возможна ситуация, когда ЛПР с квалификацией эксперта, может выявить паразитные компоненты и не только не принимать их во внимание, но и дополнить информационный компонент сообщения собственными знаниями. Однако знания эксперта есть не что иное, как априорная информация, независимая от сообщения. Само же сообщение, как нетрудно видеть, в таком случае тезаурус ЛПР несколько не расширяет.

Представляется целесообразным оперировать понятием *оптимальной интерпретации семантики сообщения*, поскольку цель ЛПР состоит в извлечении из него исключительно достоверных сведений (информации), в то время как наличие в сообщении шума и недостоверных сведений (дезинформации) играет роль ограничений для достижения этой цели.

Рассмотрим ситуацию, характерную для процесса управления, когда ЛПР на основе сообщения, полученного от ОУ принимает решение о выборе управляющего воздействия и его адекватного доведения до ОУ посредством передачи сообщения $S_{упр}$. Формально модель такой задачи можно представить в виде кортежа:

$$S_{упр} = \langle F_u, S_{пр}, M_{реш}, R, S_{ф}, K \rangle, \quad (1.8)$$

где F_u – цель принятия решения (перевод ОУ в требуемое состояние), $S_{пр}$ – исходные сведения для порождения альтернативных вариантов решения, $M_{реш}$ – множество порожденных ЛПР альтернатив, R – выбранное решение, $S_{ф}$ – сообщение, формируемое ЛПР для передачи в ОУ управляющего воздействия, K – критерии, на основе которых ЛПР выбирает конкретное решение.

Действия ЛПР состоят в преобразовании исходных сведений $S_{пр}$ в решение R :

$$R = K \{F(S_{пр}) \rightarrow \exists M_{реш}\} \quad (1.9)$$

Введем понятия качества принимаемых решений и эффективности процесса управления, отталкиваясь от базовых положений теории эффективности [2, 5], в которой понятия качества и эффективности (в широком смысле) формулируются следующим образом:

Качество – совокупность существенных свойств системы, определяющее степень ее пригодности для использования по назначению.

Эффективность – комплексное операционное свойство процесса функционирования системы, характеризующее степень его приспособленности к

достижению цели системы.

Следует подчеркнуть, что понятие *качества* интегрирует весьма широкий круг общесистемных и внутрисистемных свойств (частных показателей качества), оставляя для объединения понятием *эффективности* всего три ее частных показателя: результативность (степень достижения целевого эффекта), оперативность и ресурсоемкость. К этим трем ключевым показателям естественным образом сводятся все остальные операционные свойства систем.

Дело в том, что в практике оценивания эффективности используется достаточно широкий круг понятий, в частности, производительность, экономичность, мобильность, продуктивность, мощность и другие. Однако следует подчеркнуть, что все они (без исключения) могут быть сведены к трем выше-названным ключевым показателям, отражающим в совокупности исчерпывающую триаду: *результат – ресурсы – время*.

При этом некоторые используемые показатели эффективности обобщают только два из трех ключевых, например, производительность ограничена учетом только результативности и оперативности, а экономичность – только результативности и ресурсоемкости.

Необходимо также обратить особое внимание на то, что между *оперативностью* и *ресурсоемкостью* существует неоднородная (векторная) связь, при которой улучшение одной из этих характеристик неизбежно приводит к ухудшению второй. Именно поэтому при оценивании эффективности систем не используется критерий превосходства [14], требующий, чтобы все существенные показатели системы имели одновременно свои наилучшие (оптимальные) значения. Следовательно, установление наилучшего компромисса между оперативностью и ресурсоемкостью в зависимости от цели и условий управления составляет для ЛПР неизменную *оптимизационную задачу*.

Следуя сложившейся терминологии, введем понятие качества решения как *совокупность существенных свойств решения, определяющих степень его пригодности для доведения до объекта управления (ОУ) управляющего воздействия*. Тем самым мы придаем определению прагматический аспект, поскольку речь идет об использовании выбранного на множестве альтернатив решения по назначению: для перевода ОУ в требуемое состояние в конкретном цикле управления.

Подчеркнем, что принятое решение отражает *модель ситуации* (состояния ОУ и обстановки) которую ЛПР синтезировал к моменту передачи в ОУ управляющего воздействия — в виде того или иного сообщения. Степень адекватности модели реальной ситуации ограничена запасом времени, которым располагает ЛПР для ее построения.

Совершенно очевидно, что управленческое решение представляет собой *информационный объект*, который в большинстве случаев синтезируется (формулируется) в виде мысленного и/или текстового сообщения, характеризуемого (обладающего) вполне определенной семантикой.

В случаях, когда речь идет об управлении в организационных, и тем более, в иерархических системах, то вряд ли удастся обеспечить другую возможность доведения управленческого решения до объекта управления (ЛПР низестоящего уровня иерархии), кроме передачи соответствующего текстового или устного сообщения.

Рассмотрим теперь, какие характеристики сообщения (решения) следует отнести к числу его существенных свойств. Представляется, что наряду с *достоверностью, актуальностью и своевременностью* к таковым следует отнести, в первую очередь, *полноту и точность*, поскольку они определяют в каждом конкретном случае тонкую грань, отделяющую исчерпывающую достоверность от подчас лукавого умолчания.

При этом под *полнотой* будем понимать такую качественную характеристику сообщения, которая определяет наличие в нем сведений, необходимых и достаточных для адекватной интерпретации сообщения его приемником (при условии корректного осуществления процедуры интерпретации).

Введем понятие эффективности процесса управления как *комплексное операционное свойство упорядоченного множества управляющих воздействий, характеризующее его приспособленность к достижению цели управления*. Естественным критерием достижения цели управления является приведение объекта управления в состояние, определенное как требуемое, процедурой целеполагания. Что касается частных показателей эффективности управления, то, в соответствии с общей теорией эффективности [14], то они, как уже отмечалось, исчерпывающим образом ограничены триадой результативности, оперативности и ресурсоемкости.

Отметим, что введенное определение не противоречит используемому в литературе [14] критерию эффективности управления, определяемому как *степень соответствия управляющих воздействий реальным состояниям объекта управления*. При этом, однако, представляется целесообразным придерживаться четкого разграничения таких понятий, как *качество решения* (решений) и *эффективность процесса управления*.

1.8. Остаточная неопределенность решения

Поскольку процесс управления принципиально является циклическим, то необходимым условием достижения цели управления является перевод объекта управления в требуемое (оптимальное) состояние *в каждом цикле управления*. Поэтому даже разовое невыполнение этого условия будет негативно сказываться на эффективности управления, приводя к ухудшению ее частных показателей, вплоть до невозможности достижения цели, в том числе, в связи с исчерпанием ресурсов или/и времени.

В реальных условиях ситуации принятия решения возможность полного снятия неопределенности относительно состояния объекта управления и обстановки — явление крайне редкое. Это, в частности,

связано с необходимостью принятия (порождения) решения в течение ограниченного промежутка времени. Поэтому в процессе моделирования ситуации ЛПР нередко бывает вынужденным, наряду с расчетными и логическими процедурами, использовать процедуры эвристические, т.е. в определенной степени руководствоваться интуитивными соображениями.

Это обстоятельство определяет целесообразность использования для *априорного* оценивания качества принятого решения критерия минимума эвристики, которые могут служить качественной мерой неопределенности решения [12]. Однако, чем более коротким промежутком времени будет располагать ЛПР на принятие решения, тем большая степень неопределенности будет у него оставаться относительно адекватности выбираемого решения реальной ситуации. Иными словами, ЛПР нередко бывает вынужден вносить в направляемое к объекту управления сообщение шумовой компонент.

Критерий ценности (полезности) информации [2], в свою очередь, может быть использован для *апостериорного* оценивания качества решения (или локальной эффективности единичного управляющего воздействия) по показателю возрастания вероятности достижения цели в результате использования содержания соответствующего сообщения по назначению.

При этом заслуживает внимания следующее обстоятельство, отмеченное выше: одним из количественных показателей ценности информации может служить ее стоимость. Принятие решений в условиях неполной определенности, как известно, связано с риском выбора не оптимального решения. Поэтому цена ошибочного выбора есть разница между выбранной альтернативой и наилучшей из имевшихся альтернатив, которая была бы выбрана ЛПР при наличии исчерпывающей (чистой) информации относительно ситуации принятия решения. Именно поэтому одной из экономических категорий является понятие «ожидаемые потери от упущенных возможностей» [9].

Отметим, что широко применяемый в задачах выбора стратегий в условиях статистической неопределенности («игра с природой») критерий Л. Сэвиджа [10] как раз и отражает сожаление ЛПР по поводу того, что выбранное осторожное решение не оказалось наилучшим в данной ситуации, определяемой как состояние объекта управления и обстановки (окружающей среды). Впрочем, сожаление другого рода ЛПР испытывает также и при использовании чрезмерно оптимистичных критериев [11].

В ситуациях, когда ЛПР располагает определенным интервалом времени на принятие решения, он может посвятить его поиску недостающей информации (в том числе, путем минимизации шума и дезинформации), а в ряде случаев — ее приобрести на рыночных условиях.

При этом следует иметь в виду, что процесс получения (приобретения) информации характеризуется экспоненциальной зависимостью с насыщением: на начальном этапе количество найденной полезной информации нарастает быстро, но через некоторое

время поиск дополнительных сведений становится все более неэффективным.

Формально это накладывает ограничение на состав и семантику выбранного решения:

$$R_S = R_u + H_R \text{ при } \Delta T \leq \Delta T_{дон}, \quad (1.10)$$

где R_S - содержание сообщения, отражающего решение, принятое ЛПР для реализации управляющего воздействия в отношении ОУ, R_u - информационный компонент сообщения, H_R - остаточная неопределенность (энтропия) решения, положенного в основу сообщения с командной информацией для ОУ, $\Delta T_{дон}$ - допустимая продолжительность промежутка времени на принятие решения.

Остаточная неопределенность решения порождается, во-первых, шумовой и дезинформационной составляющими, обусловленными неадекватностью полученного ЛПР сообщения (2.1) относительно реального состояния объекта управления и обстановки. Во-вторых, ЛПР в общем случае вносит в процессе декодирования и интерпретации семантики принятого сообщения дополнительную неопределенность, поэтому:

$$H_R = H_R^{ucx} + H_R^{ЛПР} \quad (1.11)$$

где H_R^{ucx} - остаточная неопределенность решения, обусловленная полученным ЛПР сообщением, $H_R^{ЛПР}$ - остаточная неопределенность, внесенная ЛПР. Соответственно, сообщение, несущее управляющее воздействие, имеет вид:

$$S_{упр} = K_u^{ЛПР} + H_R, \quad (1.12)$$

где $K_u^{ЛПР}$ - информационный компонент, сформированный ЛПР на основе достоверных сведений относительно состояния ОУ.

Остаточная неопределенность решения предопределяет неполное соответствие управляющего воздействия реальному состоянию ОУ. При оперативном управлении в реальном времени промежуток времени на принятие решения в каждом цикле управления существенно ограничен, поэтому возникновение нестандартной ситуации нередко приводит к принятию ошибочных (неадекватных) решений, которые, будучи реализованными в виде управляющих воздействий, снижают эффективность функционирования ОУ вплоть до ухода с траектории, направленной на достижение цели.

Таким образом, наличие в полученном ЛПР сообщении о состоянии ОУ шумового и дезинформационного компонентов автоматически приводит к выбору решения, в той или иной степени не соответствующего реальному состоянию ОУ и обстановки. При этом ЛПР, принимая решение в условиях дефицита времени, может вносить еще и дополнительную ошибку по отношению к реальному состоянию ОУ и обстановки.

Подобная ситуация в наиболее полной мере характерна для иерархического управления, которое с необходимостью вводится в системах с неполной информацией в соответствии с *принципом необходимой иерархии*. Этот принцип утверждает, что с ростом неопределенности относительно состояний системы и обстановки в ситуациях принятия решений для эффективного управления требуются все более высокие уровни иерархии.

При этом возникает известная проблема [2.8], связанная с заметным возрастанием вероятности появления дезинформации в сообщениях, передаваемых с нижних уровней иерархии на верхние. Это обстоятельство необходимо учитывать в условиях интенсификации процессов управления, в том числе, в условиях корпоративной мобильности. При всех бесспорных достоинствах этой технологии [2.9] она потенциально способствует росту остаточной неопределенности управленческих решений. Исключительная сложность решения этой проблемы обусловлена тем, что ее корни лежат в глубинах человеческой психики. Однако проблемы, порождаемые современными информационными технологиями, в том числе, психологического характера, могут быть решены на основе дальнейшего совершенствования этих технологий. Можно предполагать, что пути ее решения связаны с прогрессом в области разработки систем искусственного интеллекта. Поэтому исследование указанной проблемы на системном уровне представляет собой весьма актуальную задачу.

2. УПРАВЛЕНИЕ КАК ПРОЦЕДУРА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

2.1. Структура системы с управлением

Под управлением в наиболее общем виде будем понимать процесс обеспечения *целенаправленного поведения* реальной системы последовательностью управляющих информационных воздействий, производимых человеком или устройством.

Нередко в литературе друг другу противопоставляются системы с управлением и без управления. При этом имеется в виду, что искусственные системы отличаются от природных систем наличием цели функционирования (назначением) и осуществлением управления. Однако, по нашему мнению, при более общем взгляде на проблему следует принимать во внимание существование в природе (по крайней мере, в живой природе) эволюционной цели (адаптация с целью выживания, сохранение и усложнение структуры, т.е. самоорганизация) и управления поведением как средства достижения этой цели.

Современная практика работы со сложными системами идет по пути разработки автоматизированных *информационных систем*, являющихся эффективным инструментом повышения обоснованности и оперативности управленческих решений. Под информационной системой будем понимать систему сбора, обработки и передачи информации в целях управления. В терминах теории систем информационную систему можно определить, как *совокупность элементов ввода, хранения, обработки, поиска, вывода и распространения информации, связанных между собой и составляющих определенное целостное единство*.

К основным задачам управления относятся целеполагание, стабилизация, выполнение программы, слежение, оптимизация и адаптация.

Задача *целеполагания* состоит в определении требуемого поведения или состояния системы.

Задача *стабилизации* сводится к удержанию системы в требуемом состоянии в условиях возмущающих воздействий.

Задача *выполнения программы* заключается в последовательном переводе системы в требуемые состояния в условиях, когда значения управляемых величин изменяются по детерминированным законам.

Задача *слежения* представляет собой удержание системы на заданной траектории (обеспечение требуемого поведения системы) в условиях, когда изменение управляемых параметров носит случайный характер.

Задача *оптимизации* направлена на перевод системы в состояние с экстремальными значениями характеристик (удержание ее в этом состоянии) при заданных условиях и действующих ограничениях.

Задача *адаптации* состоит в приспособлении системы к изменяющимся условиям окружающей среды (обстановки) путем адекватного изменения своей структуры и поведения.

Как следует из этих определений, все задачи управления предполагают функционирование реальных систем в реальных условиях внешней среды, накладывающей на требуемое поведение системы те или иные ограничения. Поэтому для эффективного управления необходимо располагать как можно более полной информацией о поведении внешней среды, порождающей, в том числе, стохастические неуправляемые воздействия.

Структура любой системы с управлением включает три обязательные подсистемы (рис): управляющую систему (УС), объект управления (ОУ) и систему связи (СС). Управляющая система вместе с системой связи образует систему управления (СУ). Система связи включает *канал прямой связи*, по которому на входы объекта управления поступает командная информация (управляющие воздействия) и *канал обратной связи*, по которому на входы управляющей системы поступает информация (сообщения) о состоянии объекта управления в виде его выходных сигналов. Наличие замкнутой петли обратной связи является обязательным.

Кроме того, объект управления взаимодействует с окружающей средой, которая создает различного вида помехи и ограничения, и сама испытывает воздействие объекта управления. В общем случае в управляющую систему поступает только часть информации о состоянии объекта управления и воздействиях на него окружающей среды.

Пусть $X=\{x\}$ – множество управляющих сигналов, $Y=\{y\}$ – множество выходных сигналов ОУ, $N=\{n\}$ – множество неуправляемых воздействий внешней среды на ОУ, $Y'=\{y'\}$ – подмножество сигналов о состоянии ОУ, поступающее в УС, $N'=\{n'\}$ – подмножество сигналов о воздействиях внешней среды, поступающее в УС.

Очевидно, что множество $Y=\{y\}$ непосредственно связано с множеством $Z=\{z\}$ внутренних состояний ОУ. При этом нет никаких гарантий, что эта связь носит однозначный характер. Действительно, рассмотрение ОУ в качестве «черного ящика» говорит о том, что один выходной сигнал может отражать разные

его внутренние состояния с учетом состояний обстановки. Так, например, если автомобиль «ведет», скажем, влево на сухом асфальте и на льду, то водителю требуется выполнить совершенно разные управляющие воздействия в зависимости от состояния обстановки. С другой стороны, разные выходные сигналы могут отражать одно и то же внутреннее состояние управляемой системы.

Управляющая система создается для реализации задач целеполагания, стабилизации, слежения, выполнения программы, оптимизации и адаптации путем воздействия на объект управления и/или изменения результатов воздействия внешней среды в каждом цикле управления. Объект управления создается для использования по назначению, т.е. выполнения определенной функции с определенными целями.

Что касается системы связи, то ее роль состоит в обеспечении контура обратной связи, суть которой – получение УС информации о состоянии ОУ и его изменение в соответствии с целями управления. Здесь необходимо особо подчеркнуть следующее обстоятельство. На вход УС по контуру обратной связи поступают выходные сигналы ОУ. На основании этих сигналов ЛПР УС необходимо сделать вывод относительно соответствующих им внутренних состояний ОУ. В этом состоит обратная задача управления: определение внутреннего состояния ОУ, породившего наблюдаемый выходной сигнал.

2.2. Аксиомы теории управления

При всем разнообразии задач управления для их успешной реализации необходимо выполнение ряда естественных условий, которые сформулированы в виде аксиом.

Аксиома 1. Наличие цели управления. Под целью управления понимается тот набор характеристик ОУ, который определяет его требуемое состояние к моменту окончания процесса управления. Цель управления формулируется в результате выполнения процедур целеполагания, относящихся к наиболее сложным и ответственным функциям УС. В случае неопределенной цели управление не имеет смысла, поскольку будет представлять собой случайное блуждание в пространстве состояний ОУ. Считается, что чем более точно и определенно поставлена цель управления, тем более эффективным будет сам процесс управления.

Аксиома 2. Наличие наблюдаемости объекта управления. В теории управления принято следующее положение: ОУ считается наблюдаемым в состоянии $z(t)$ на множестве моментов времени $T = \{t\}$ при входных воздействиях $X = \{x(t)\}$, если уравнение наблюдения динамической системы (2.4), записанное в виде

$$y^*(t) = g[x(t), z^*(t), t], \quad (2.1)$$

где $y^*(t)$ – определенная реализация выходного сигнала ОУ, доступная для регистрации), имеет единственное решение

$$z^*(t) = z(t) \in Z. \quad (2.2)$$

При выполнении этого условия для всех $z(t) \in Z$

объект управления считается полностью наблюдаемым. Такая формулировка означает, что определение любого из возможных состояний ОУ возможно только в том случае, если при известных значениях входных переменных $x(t)$ по результатам измерения выходных переменных $y^*(t)$ может быть получена однозначная оценка любой переменной внутреннего состояния $z(t)$.

Такая задача, называемая *задачей наблюдения*, реализуется за счет выполнения функции контроля текущего состояния ОУ по контуру обратной связи. Отметим, что в общем случае входные сигналы (переменные) ОУ содержат как управляемые (командные) сигналы, так и неуправляемые воздействия внешней среды.

Аксиома 3. Наличие управляемости ОУ, т.е. его способности переходить в пространстве состояний Z под управляющим воздействием со стороны УС из любого текущего состояния в требуемое состояние. Речь идет не только об изменении параметров функционирования ОУ, но также и об изменении его структуры, алгоритма и закона функционирования и других свойств. Если ОУ может оказаться в состоянии, из которого УС не сможет его вывести, не располагая необходимым управляющим воздействием, то принято говорить о потере управляемости.

Аксиома 4. Наличие у ЛПР УС свободы выбора управляющих воздействий (решений) на определенном множестве допустимых альтернатив. Ограничение множества управляющих воздействий ведет к снижению эффективности управления, поскольку возрастает вероятность, что оптимальные воздействия окажутся за пределами области допустимых решений. Если указанное множество ограничено одной альтернативой, то управление не требуется. Если принимаемые решения не влияют на состояние ОУ, то управление отсутствует.

Аксиома 5. Наличие ресурсов управления, обеспечивающих реализацию принятых решений. Речь идет о самых разнообразных ресурсах – материальных, финансовых, кадровых (трудовых), а также интеллектуальных, информационных, вычислительных и других. В частности, известно понятие административных ресурсов. Особый вид ресурсов составляет время, отводимое на достижение цели управления. Недостаток ресурсов или их нерациональное использование, как правило, оборачиваются невыполнением поставленных задач. Статистика, в частности, свидетельствует: около двух третей инвестиционных проектов не укладываются либо в отведенное время, либо в бюджет, либо ни в то, ни в другое. Без ресурсов управление невозможно.

Отметим, что эта аксиома смыкается с аксиомой свободы выбора, ибо отсутствие ресурсов равносильно отсутствию свободы выбора. Поэтому неудивительно, что в человеческом обществе доступные ресурсы определяют выбор рода деятельности.

Аксиома 6. Наличие критерия эффективности управления. Наиболее общим (и естественным) критерием эффективности управления (определяемой качеством принимаемых решений) является степень

достижения цели функционирования системы. В случае, когда цель относится к числу качественных целей, т.е. существует только две альтернативы (либо цель достигнута, либо не достигнута) естественный критерий - это сам факт достижения цели.

2.3. Функции управления

К числу систем с управлением или целенаправленных систем будем относить биологические, технические, организационные, социальные и экономические системы. Особое внимание будем уделять рассмотрению *организационно-технических систем*, представляющих собой совокупность техники и людей, объединенных для достижения определенных целей. Важнейшим элементом организационно-технических систем управления является *лицо, принимающее решение (ЛПР)* – человек или группа людей, имеющих полномочия для окончательного выбора управляющего воздействия из множества возможных, или, иными словами, для принятия решения на множестве альтернатив.

Лицо, принимающее решение выполняет функцию преобразования содержания информации о состоянии ОУ и окружающей среды в управляющую информацию, т.е. порождения в каждом цикле управления новой информации на основе решения логических задач, выполнения расчетных и эвристических процедур. Эта группа функций, безусловно, является главной в управлении, она связана с расходом интеллектуальных ресурсов и времени. Поэтому автоматизация функций ЛПР представляет наибольшую сложность и имеет первоочередную важность.

Множество функций управления связано с преобразованием информации и, как уже отмечалось, естественным образом делится на три подмножества:

- функции преобразования содержания информации или принятия решений $\{f_c\}$;
- функции обмена информацией $\{f_o\}$;
- рутинные функции обработки информации $\{f_p\}$.

Функции принятия решений $\{f_c\}$ состоят в последовательном преобразовании содержания информации о текущей ситуации (состоянии ОУ и окружающей среды) в информацию о требуемой ситуации, создаваемую путем выбора на множестве альтернатив. Такое преобразование часто называют *семантическим*.

Подмножество функций $\{f_o\}$ связано с регулярным обменом информацией между УС и ОУ по каналу обратной связи, в частности, с доведением принятых решений и получением сведений о состоянии системы и окружающей обстановки.

Группа функций $\{f_p\}$ включает учет (регистрацию), хранение, тиражирование, поиск, каталогизацию информации (сообщений). Она связана исключительно с преобразованием формы ее представления, но не содержания.

Циклом управления будем называть совокупность функций управления, выполняемых при каждом изменении ситуации (состояния ОУ и внешней среды) т.е. от одного управляющего воздействия до другого. Последовательно выполняя один цикл управления за

другим, УС приближает ОУ к поставленной цели.

Совершенствование систем с управлением требует сокращения времени на принятие решения, т.е. сокращение длительности цикла управления и повышения качества принимаемых управляющих решений, т.е. их соответствие состояниям ОУ. Эти требования носят *противоречивый* характер, поскольку сокращение времени на принятие решения ограничивает количество принимаемой во внимание информации и, следовательно, увеличивает вероятность принятия неоптимального решения. Разрешение этого противоречия возможно только путем существенного повышения производительности УС в части передачи и переработки информации.

С возрастом сложности современных систем с управлением количество информации, подлежащей переработке, растет нелинейно, притом, что скорость обработки информации человеком весьма ограничена. Стало очевидным, что увеличение численности персонала с целью повышения эффективности управления полностью себя исчерпало. Для координации работы необходим специальный аппарат, возникают потоки информации внутри аппарата, на их обслуживание требуются дополнительные исполнители. В результате оперативность управления не только не возрастает, но зачастую падает.

Такие приемы, как применение новых методов решения управленческих задач, изменение структуры систем управления, перераспределение функций управления, механизация управленческого труда также показали ограниченность своих возможностей. Дело в том, что они, в основном, позволяют повысить эффективность выполнения функций обмена информацией и ее рутинной обработки. Безусловно, сокращение времени на сбор, поиск, прием и передачу информации, преобразование ее формы, защиту от помех и других воздействий способствует *повышению оперативности управления*.

Однако основным в задачах управления остается *повышение степени научной обоснованности принимаемых решений*. Именно необходимость повышения производительности выполнения творческих процедур с настоятельностью требует их автоматизации. Применение математического аппарата в ходе анализа и прогнозирования развития ситуации для принятия решения во многих задачах позволяет находить оптимальные или, по крайней мере, рациональные решения, но требует значительных интеллектуальных и временных затрат. Поэтому *снижение трудозатрат ЛПР* на выполнение трудоемких расчетных процедур позволяет сосредоточить внимание на творческих процессах управления и обеспечить тем самым своевременность принятия решений.

Следовательно, насущная необходимость автоматизации управления на базе современных информационных систем, обусловленная стремительным усложнением систем с управлением, носит объективный характер. Однако, являясь, пожалуй, наиболее востребованным, этот путь связан с преодолением значительных трудностей. Базируясь на системной методологии, он требует отказа от общепринятых стандартов мышления и существенного повышения

уровня образования общества.

2.4. Содержание функций управления

Применительно к обеспечению эффективности управления системный анализ, представляющий собой методологию разрешения проблем, как нельзя более подходит для снятия противоречий между состояниями объектов управления и обстановки. В целом же методология системного анализа в управлении выступает в качестве средства снятия неопределенности, регулярно возникающей в процессе выбора управленческих решений.

Основу управления составляет преобразование информации о состоянии объекта управления в командную информацию. Речь идет о преобразовании содержания (смысла) сообщения о состоянии объекта управления, в результате которого создается новая информация в виде решения о выборе управляющего воздействия. Управление как информационный процесс в организационных (организационно-технических) системах представляет собой последовательность функций, составляющих технологический цикл управления. При этом под функцией управления понимается устойчивая упорядоченная последовательность операций, выделенная в соответствии с принципом разделения труда в управляющей системе.

Функциональный подход к декомпозиции процесса и циклов управления позволяет выделить следующие функции управления:

- сбор данных;
- подготовка сообщения;
- передача сообщения по каналу связи;
- регистрация данных (учет);
- контроль;
- анализ;
- оперативное управление;
- планирование;
- прогнозирование;
- организация;
- координация;
- доведение решений.

Особую группу составляют функции управления, связанные с учетом человеческого фактора: *стимулирование* и *мотивация* персонала.

Дадим определения перечисленным функциям управления и сформируем функциональную модель цикла управления (рис.2).

Сбор данных представляет собой функцию измерения или оценивания контролируемых характеристик объекта управления, выполняемого персоналом объекта управления для передачи соответствующих данных в управляющую систему.

Подготовка сообщения (запроса) – преобразование собранных данных к виду, пригодному для передачи по каналам связи в управляющую систему. В определенных случаях сообщение о состоянии объекта управления может передаваться по запросу из управляющей системы.

Передача сообщения по каналу связи – реализа-

ция функции f_o обмена сообщениями при выполнении требований своевременности, достоверности и безопасности передачи.

Регистрация данных (учет) – группа рутинных функций f_p , обеспечивающих хранение полученных данных. Эта группа функций включает ввод-вывод данных, поиск, преобразование формы, отображение, копирование и тиражирование, статистическую обработку. Сюда относится также обеспечение целостности и конфиденциальности данных

Контроль – множество функций, направленных на определение состояния объекта управления в каждом цикле управления. Среди функций контроля следует выделить измерение (оценивание) своевременности, достоверности, точности и полноты представления данных из объекта управления. Целью контроля является определение степени соответствия текущего состояния объекта управления его заданному состоянию.

Постановка задачи контроля включает формализацию частных задач наблюдения, классификации и идентификации состояния объекта управления.

Принято различать предварительный, текущий и заключительный контроль. Предварительный контроль проводится перед началом процесса управления для оценивания начального состояния объекта управления и возможных воздействий окружающей среды. Текущий контроль выполняется в течение всего процесса управления с целью выявления отклонений от заданного состояния. Заключительный контроль позволяет получать оценку степени достижения цели по завершению процесса управления.

Под функцией *анализа* будем понимать способ обработки результатов контроля, позволяющий выбрать и обосновать альтернативное решение либо о продолжении оперативного управления, либо о переходе к планированию. Пусть, например, контролируемый параметр y_i в результате выполнения очередного цикла управления изменяется в пределах Δy_i . Если анализ показывает, что отклонение от требуемого состояния $\Delta y_i \leq \Delta y_{i \text{ доп}}$, где $\Delta y_{i \text{ доп}}$ - допустимое отклонение, то принимается решение о переходе (продолжении) к оперативному управлению. Если же $\Delta y_i > \Delta y_{i \text{ доп}}$, то принимается решение о переходе к осуществлению функции планирования.

Отметим, что нередко функции контроля и анализа рассматриваются совместно как единая функция управления, связанная с измерением и оцениванием величины отклонения текущего состояния объекта управления от его оптимального состояния. Нетрудно убедиться, что при проведении такого оценивания используется аналог критерия пригодности, рассмотренного выше применительно к оцениванию качества и эффективности.

Оперативное управление имеет целью обеспечение функционирования системы (объекта управления) в соответствии с принятым планом действий по выполнению задачи управления. В зависимости от поставленной задачи оперативное управление может быть направлено на стабилизацию, слежение, выполнение принятой программы управления (движение по траектории в параметрическом пространстве). В

ряде случаев задачей оперативного управления может быть оптимизация параметров управляемой системы или ее адаптация к условиям обстановки.

Функция *планирования* направлена на последовательное снятие неопределенности относительно структуры и закона функционирования объекта управления, а также состояния обстановки. Переход к планированию осуществляется при качественном изменении условий функционирования системы и/или обстановки, препятствующем продолжению оперативного управления. Очевидно, что планирование представляет принятие решений по целеполаганию, однако, как функция управления, оно включает также принятие решений по соответствующим действиям, направленным на достижение требуемого состояния системы и /или окружающей среды.

Принято разделять планирование стратегическое и тактическое. На этапе стратегического планирования определяется необходимость перестройки структуры объекта управления, его выходных параметров, а также закона и алгоритма функционирования. В ходе тактического планирования принимается решение по выбору траектории перевода системы в требуемое состояние с учетом имеющихся ресурсов и ожидаемых состояний обстановки.

Функция *прогнозирования* состоит в снятии неопределенности относительно возможной структуры, закона и алгоритма функционирования системы *в будущем*. Независимо от обстоятельств, прогноз представляет собой научно обоснованное суждение о возможном состоянии объекта управления и обстановки в достаточно отдаленном будущем, а также об альтернативных вариантах и сроках достижения предполагаемого целевого состояния.

Основными целями прогнозирования, как правило, являются:

- предупреждение неблагоприятных состояний обстановки, в которых может оказаться организационная система;
- выбор варианта структуры системы, адекватной прогнозируемым состояниям обстановки;
- выбор организационных и технических решений, способных обеспечить эффективное функционирование системы в будущем.

Очевидно, что важность получения достоверного прогноза исключительно велика. Именно поэтому для прогнозирования привлекаются специалисты высокой квалификации – эксперты. Для получения особо важных прогнозов используются процедуры коллективной экспертизы, в том числе трудоемкий и дорогостоящий метод Дельфи.

Прогнозы принято различать по длительности периодов упреждения будущего (промежуткам времени на которые рассчитан прогноз). Оперативные прогнозы строятся на период, в течение которого объект управления существенно не меняется, краткосрочный – рассчитывается на перспективу количественных изменений. Среднесрочные прогнозы захватывает промежуток времени, в течение которого ожидается преобладание количественных изменений над качественными. Наконец, долгосрочные про-

гнозы строятся на перспективу качественных изменений системы и обстановки.

Функция *организации* заключается в образовании оптимальных связей между всеми компонентами объекта управления, установлении порядка и условий (в том числе, ограничений) их функционирования, распределении ресурсов системы в интересах оперативного достижения целевого эффекта. Эта функция обеспечивает:

- агрегирование функциональных элементов и ресурсов в виде организационных структур;
- распределение ответственности между ЛПП различных уровней иерархии.

Функция *координации* направлена на обеспечение согласованного взаимодействия подсистем в соответствии с общесистемными целями и поддержание этой согласованности в течение всего процесса управления вплоть до достижения цели. Основная задача координации состоит в устранении противоречий, между частными целями подсистем, формируемыми разными ЛПП в процессе функционирования организационных систем. Именно эта особенность организационных систем порождает одну из основных сложностей управления ими.

2.5. Моделирование функций управления

Построение моделей функций управления необходимо с точки зрения задач их автоматизации с целью эффективного управления организационными системами. Особенно важной представляется задача автоматизации процесса принятия управленческих решений, связанных с семантическим преобразованием информации.

2.5.1. Модель функции контроля

Моделирование функции контроля обеспечивает отображение трех частных задач, составляющих в совокупности общую задачу контроля состояния объекта управления. Речь идет о задачах наблюдения, классификации и идентификации.

Задача наблюдения.

Состояние системы (объекта управления) $z(t) \in Z$ в каждый момент времени характеризуется множеством переменных z_i , меняющихся вследствие *внутренних* возмущений, управляемых и неуправляемых (*внешних*) воздействий. При этом переменные состояния $z(t)$ в общем случае могут быть неизвестны, и судить об их физической природе и величине оказывается затруднительным. Выходные же переменные $y(t)$ являются конкретными физическими величинами, они наблюдаемы и измеряемы. Потому определение состояния объекта реально осуществимо именно в пространстве выходных переменных.

Формально определение произвольного состояния объекта возможно только в том случае, когда в результате измерения выходных переменных $y(t)$ при известных значениях входных переменных $x(t)$ может быть получена достоверная оценка любого внутреннего состояния $z(t)$. В этом и состоит задача наблюдения теории управления. Она сводится к решению относительно $z(t)$ уравнения

$$G(t, x(t), z^*(t)) = y^*(t), \quad (2.1)$$

где G – оператор, $y^*(t)$ – реализация выходного сигнала, доступная для регистрации.

Система может считаться наблюдаемой в состоянии $z(t)$ на множестве моментов времени T при входном воздействии $x(t)$ и отсутствии возмущений, если уравнение (3.3) имеет единственное решение $z^*(t) = z(t) \in Z$. Если такое утверждение выполняется для любого $z(t) \in Z$, то объект управления считается *полностью наблюдаемым*.

Необходимое и достаточное условие полной наблюдаемости системы состоит в том, что каждый элемент $y(t) \in Y$ при фиксированных значениях t и $x(t)$ имеет в качестве прообраза единственный элемент $z(t)$. Это означает, что каждому состоянию системы должно соответствовать одно и только одно значение выходной переменной. Следовательно, должно существовать отображение, обратное уравнению наблюдения, которое позволяет воспроизводить внутренние состояния объекта управления по наблюдаемым выходным характеристикам, порождаемым этими внутренними состояниями:

$$g^{-1}: Y \rightarrow Z. \quad (2.2)$$

Благодаря наличию такого обратного преобразования выходные переменные могут быть использованы в качестве признаков наблюдаемого текущего состояния объекта управления. Иными словами, при полной наблюдаемости объекта управления всегда имеется возможность определения его состояния по результатам измерения его выходных характеристик.

Очевидно, что весьма важным для обеспечения полной наблюдаемости системы является определение набора элементов (контрольных точек), в которых производится измерение существенных выходных характеристик. В организационных системах ответственность за полноту, достоверность и точность данных о состоянии системы несет ЛПР объекта управления.

Решением задачи наблюдения функция контроля не исчерпывается.

Задача классификации. Эта задача состоит в отнесении конкретного наблюдаемого состояния объекта управления к одному из сформированных (заданных) классов эквивалентности. Дело в том, что каждое конкретное состояние объекта относится к одному из подмножеств его текущих состояний, обладающих некоторыми общими свойствами. Речь идет о таких состояниях, по отношению к которым принимаются одинаковые решения. Формально задача классификации формулируется следующим образом: необходимо найти отображение

$$\xi: Y \rightarrow R, \quad (2.3)$$

где R – множество классов состояния объекта управления.

При решении задачи классификации множество возможных состояний объекта, которое, в принципе может быть неограниченным, разбивается на конечное и, как правило, ограниченное, количество непесекающихся классов, соответствующих состояниям с определенными общими признаками. Далее устанавливается принадлежность любого конкретного (эмпирического) состояния объекта управления

одному из классов.

Иными словами, задача классификации сводится к формированию определенных *агрегированных состояний* объекта управления. Термин «агрегирование», обычно означающий объединение компонентов системы в рамках общей функциональной задачи, применительно к задаче классификации имеет смысл объединения в определенный класс эквивалентности по совокупности общих признаков. Следовательно, множество агрегированных состояний задает типы состояний, к одному из которых будет отнесено конкретное наблюдаемое состояние объекта управления.

Задача идентификации (распознавания образов). Формально эта задача состоит в выполнении преобразования:

$$\eta: R \rightarrow S, \quad (2.4)$$

где S – оценка конкретного реального состояния системы, полученная в результате очередного измерения ее входных и выходных характеристик.

Следовательно, преобразование η ставит в соответствие определенному типу состояния объекта управления R единственное конкретное решение S о его истинном реальном состоянии. На практике при идентификации реального состояния объекта учитывается вероятность возможных ошибок измерения, погрешностей средств измерения, помех в каналах связи и других причин неполного соответствия полученных данных реальному состоянию объекта управления.

2.5.2. Моделирование функции прогнозирования

При решении задач прогнозирования исходят из обоснования предположений о предстоящих *качественных* изменениях систем в относительно отдаленном будущем. В таком случае речь идет о формировании долгосрочных прогнозов, для получения которых целесообразно использовать логические процедуры и/или экспертные методы.

Логические методы прогнозирования базируются на выявлении аналогии функционирования или развития рассматриваемой системы с этапами жизненного цикла некоторой *другой системы (аналога)*.

Экспертные методы прогнозирования основаны на использовании опыта и латентных знаний (интуиции) квалифицированных специалистов, привлекаемых для содействия ЛПР в выборе решений в условиях неопределенного будущего. Наиболее надежные прогнозы обеспечивает применение разновидностей метода Дельфи, а также метода сценариев в комбинации со статистическими методами.

В случаях, когда задача прогнозирования основывается на предположении о сохранении в будущем существенных закономерностей поведения систем, т.е. перспективе в основном количественных изменений параметров, речь может идти о формировании краткосрочных либо среднесрочных прогнозов. Тогда удобно использовать процедуру экстраполяции.

Методы экстраполяции основаны на идее про-

движения установленной закономерности протекания процесса за пределы эмпирического диапазона параметров. В их основе лежит математическая операция *интерполирования* – вычисления промежуточных значений функции на основании заданного ряда ее значений. В широком смысле слова интерполирование состоит в представлении некоторой функции, некоторый набор значений которой при конкретных значениях независимой переменной задан, при помощи другой, более простой функции.

Если $y = f(x)$ – функция, заданная рядом значений y_1, y_2, \dots, y_n , которые она принимает при значениях x_1, x_2, \dots, x_n независимой переменной x , и пусть $\varphi(x)$ – произвольная (более простая) функция, принимающая при x_1, x_2, \dots, x_n те же самые значения, что и $y = f(x)$. Замена $y = f(x)$ на $\varphi(x)$ в пределах указанного интервала и представляет собой операцию интерполирования.

В отличие от интерполирования экстраполирование представляет собой процесс вычисления значений функции $y = f(x)$, находящихся за пределами ряда ее заданных значений.

Очевидно, что при обосновании прогноза экстраполирование следует использовать с определенной осторожностью. Однако, если Δx берется достаточно малым, и к тому же известно, что функция $y = f(x)$ вблизи границ заданного ряда значений изменяется плавно, то можно уверенно экстраполировать ее за пределы установленной области значений.

По мере увеличения интервала упреждения прогноза Δx , естественно, растет степень неопределенности в отношении протекания процессов дальнейшего развития системы. Поэтому методы экстраполяции применяются в сочетании со статистическими методами.

Статистические методы прогнозирования основаны на использовании теории вероятности, математической статистики и теории случайных процессов.

При реализации любых методов прогнозирования возникает задача оценивания качества прогноза. Такая задача решается посредством *верификации* прогноза. В процессе верификации анализ совокупности способов, критериев и процедур прогнозирования позволяет оценить такие показатели качества прогноза, как его достоверность, точность и обоснованность. В задачах управления качество прогнозов оценивается по результатам их использования для целей планирования и оперативного управления.

Каких-либо стандартных методов верификации прогнозов пока не существует. Однако считается, что доверительный интервал прогноза можно оценить, зная характеристики инерционности и связности системы, устойчивости ее динамики. Так, высокая инерционность системы дает основания полагать, что траектория ее изменений будет достаточно гладкой и устойчивой.

2.6. Оценивание качества решений и эффективности управления

Очевидно, что эффективность процесса управления непосредственно связана с качеством решений,

вырабатываемых управляющей системой с целью воздействия на объект управления. Поэтому в соответствии системным *принципом измерения* эффективность управляющей системы следует оценивать по степени ее содействия достижению цели всей системы с управлением.

Наиболее общим показателем эффективности управления является *степень соответствия принятых решений состояниям объекта управления*. Этот показатель количественно может быть определен значением условной энтропии, измеряющей степень несоответствия решений реальным состояниям системы.

Критерий качества принимаемых решений может быть тогда представлен в виде:

$$H(X)_{\text{треб}} \geq H(Y), \quad (2.5)$$

что означает: требуемое множество управляющих воздействий управляющей системы, представляющее собой априорную энтропию для ЛПР объекта управления, должна быть не меньше энтропии, характеризующей неопределенность ЛПР УС относительно фактического состояния объекта управления перед началом очередного цикла управления.

Практическое использование этого критерия, однако, затруднительно, поскольку он не учитывает семантики состояний ОУ и воздействий УС. Это касается и вероятностного (энтропийного) подхода в целом.

Анализ основных функций управления позволил установить, что наиболее информативными при оценивании эффективности управления являются показатели:

- ценности информации (сообщений);
- остаточной неопределенности принимаемых решений.

Показатели и критерии ценности информации мы уже рассматривали в главе 1. В соответствии с формулой Харкевича

$$I_{\text{ц}} = \log P_{\text{дц}} 1 - \log P_{\text{дц}} 0 = \log (P_{\text{дц}} 1 / P_{\text{дц}} 0),$$

ценность информации определяется путем сравнения вероятностей достижения цели до и после получения и использования по назначению того или иного сообщения. Естественный критерий ценности информации формулируется в виде правила

$$I_{\text{ц}} = \max (P_{\text{дц}}) \quad (2.6)$$

Второй из показателей оценивает относительное количество эвристических процедур, привлеченных для принятия решения. Для уяснения сущности критерия минимума эвристик целесообразно рассмотреть, из чего складывается качество решения.

Качество решения представляет собой комплексное свойство, включающее многие внутренние характеристики процесса управления, что усложняет его интерпретацию. Формально принятие решения есть процесс преобразования исходных данных, которыми располагает ЛПР, в решение:

$$\{f_{\text{реш}}\}: \{I_{\text{вх}}\} \rightarrow \{I_{\text{реш}}\}, \quad (2.7)$$

где $\{f_{\text{реш}}\}$ – множество функций преобразования информации, $\{I_{\text{вх}}\}$ – множество сведений о состоянии объекта управления и обстановки, $\{I_{\text{реш}}\}$ – командная информация.

При такой постановке процесс принятия решения состоит в порождении информационного объекта $\{I_{ex}\}$ и приведении ему в соответствие нового информационного объекта $\{I_{reu}\}$, что достигается путем последовательного снятия неопределенности относительно принимаемого решения. Каждый этап этого процесса сопровождается переходом от гипотез (пробных моделей) к конкретным данным.

При этом остаточная энтропия $H_{ост}$ связана с допустимым промежутком времени для принятия решения, ограниченным требуемой оперативностью процесса управления. Эти соображения позволяют сформулировать **принцип минимума эвристик**: *чем меньше эвристических процедур задействовано в процессе принятия решения, тем выше качество решения.*

Поэтому эффективность управления может быть оценена по разности между остаточной неопределенностью $H_{ост}$ информационного объекта $\{I_{reu}\}$ и минимальной возможной остаточной неопределенностью $H_{ост\ min}$ для этого информационного объекта. При этом фиксируется промежуток времени, отводимый для принятия решения:

$$H_{reu} = H_{ост} - H_{ост\ min} \text{ при } T_{reu} > T_{reu\ доп}, \quad (2.8)$$

где $H_{ост}$ – остаточная неопределенность информационного объекта, достигнутая в конкретной системе управления; $H_{ост\ min}$ – минимально возможная остаточная неопределенность для этого информационного объекта, обеспечиваемая в идеальной системе управления. Критерий, отражающий принцип минимума эвристик, формулируется в виде правила:

$$H_{ост\ reu} = \min(H_{ост}). \quad (2.9)$$

Согласно этому правилу лучшим признается решение, имеющее минимально возможную остаточную неопределенность. Критерий минимума эвристик в явном виде устанавливает зависимость качества решений от времени, допустимого для их выбора. Он также обладает в необходимой мере свойствами измеримости, полноты, избыточности, ясности физического смысла и чувствительности.

Если считать, что в идеальной системе управления используются оптимальные процедуры и их применение приводит к выбору наилучших решений за оптимальное время, то $H_{ост\ reu} = 0$. Если же решения в некоей гипотетической системе принимаются только на основе эвристик, то в предельном случае остаточная неопределенность решения будет близка к равновероятному (случайному) выбору решений, что эквивалентно отсутствию управления.

В реальных системах управления эвристические решения принимаются при отсутствии (ограниченности) необходимой информации и при невозможности ее получить за время, выделенное для принятия решения. Поэтому $H_{ост\ reu} = H_{ост\ min}$ и, следовательно, остаточная определенность не равна нулю.

Это дает основание для проведения сравнительного анализа решений, получаемых в разных по структуре и алгоритму функционирования системах управления, в том числе, с использованием автоматизированных систем поддержки принятия решений и экспертных систем.

2.7. Процедуры, используемые лицом, принимающим решение

В структуре мыслительной деятельности принято выделять три типа процедур: расчетные, логические и эвристические (основанные на интуиции и опыте). Сама же мыслительная деятельность имеет целью синтез модели, отражающей дискретную динамику развития реальной ситуации, и этой моделью ЛПП будет руководствоваться при выборе решений (стратегии). В зависимости от условий принятия решения (определенность, неполная определенность, неопределенность) может быть принята та или иная модель.

В зависимости от степени формализации компонентов принято различать три типа задач принятия решений.

1. *Задача оптимального выбора* может быть решена при условии, что множество альтернатив M_{reu} однозначно определено, а критерий (принцип) выбора строго формализован, т.е. ситуация является детерминированной. Это позволяет применять для решения аналитические методы или методы исследования операций. Получаемые в этом случае решения являются объективно наилучшими (оптимальным для заданных условий), поэтому их выбор не зависит от предпочтений или предубеждений ЛПП.
2. *Задача рационального выбора* возникает в случае, когда множество альтернатив однозначно определено, но принцип выбора не поддается строгой формализации, что нередко имеет место в реальной практике. В этом случае выбор зависит от того, какими критериями будет пользоваться ЛПП в зависимости от собственной системы предпочтений и отношения к риску. В частности, если имеется возможность определить или хотя бы оценить вероятность того, что выбранная альтернатива окажется наилучшей, то ЛПП имеет возможность принять разумное, т.е. рациональное решение.
3. *Общая задача принятия решения* характерна для случаев, когда имеется необходимость разрешения сложных проблем в изменяющихся условиях. Множество альтернатив M_{reu} в таких случаях может пополняться и видоизменяться, а принцип выбора не может быть формализован. При этом под общей задачей принятия решения (ОЗПР) понимается такая проблемная ситуация, когда необходимо вначале сформировать множество альтернатив, предъявляемых для выбора, затем выделить из него некоторое подмножество лучших (несравнимых) альтернатив (множество Парето), из которого и будет выбрана альтернатива, которую ЛПП оценил, как наилучшую. Для сравнительного оценивания качества альтернатив ЛПП должен определить принцип или *решающее правило* выбора.

Исходные данные для порождения альтернатив, а также множество порожденных альтернатив в общем случае могут содержать детерминированные, вероятностные и неопределенные данные.

Правила порождения и выбора альтернатив могут

быть представлены в форме аналитических выражений, логических и эвристических решающих правил, основываться на скалярных, векторных и комбинированных критериях.

Согласно принципам теории принятия решений, человек является так называемым «рациональным оптимизатором». Это означает, что при решении проблемы выбора рассматриваются все возможные варианты, соответствующие им вероятности, ожидаемая полезность и отбирается вариант с максимальной ожидаемой полезностью. Необходимо, однако, признавать, что многие решения принимаются интуитивно, т.е. на уровне подсознания. То, что мы называем интуицией, относится к скрытым (латентным) структурам сознания, которые могут самим ЛПР (экспертом) не осознаваться.

Эвристические процедуры невозможно обосновать логически или измерить количественно, они не поддаются формализации. Тем не менее, анализ показывает, что они опираются на определенные эвристические правила, позволяющие принимать многие решения оперативно и с незначительной затратой ресурсов. Так, эвристический принцип разумной достаточности побуждает остановиться на первом из вариантов, удовлетворяющих или превосходящих ожидания, или, иными словами, отвечающих известному критерию пригодности.

В свою очередь, принцип опознавательной эвристики подсказывает нам выбор знакомого, типового решения при недостатке информации. С точки зрения генерации инноваций этот принцип вряд ли может быть основным, однако не следует упускать из вида, что один из приемов научной методологии основан как раз на поиске и привлечении аналогов из других областей познания.

Итак, знания как продукт мыслительной деятельности суть структурные и динамические закономерности, характеризующие определенную предметную область познания природы и общества. Отрасль производства знаний принято называть наукой. Наука со времени своего зарождения генерирует последовательности моделей реальности, которые становятся все более полными и точными, но платой за такое увеличение определенности является возрастание сложности моделей.

2.8. Постановка общей задачи принятия решения

Одним из принципов формирования экономики знаний является преобразование генерируемых знаний в новые стратегии управления сложными техническими и организационными системами. Объективное возрастание сложности исследуемых и создаваемых систем порождает высокую неопределенность ситуации принятия решений.

Постановка общей задачи выбора стратегий или принятия решений характерна для проблемной ситуации, в которой лицо принимающее решение (ЛПР) оказывается перед необходимостью осуществить выбор наилучшей альтернативы в условиях высокой неопределенности и ограниченного лимита времени [3,

12]. Как следствие, такие задачи относятся к числу наиболее сложных.

Как уже отмечалось, в рамках системного подхода любой объект, явление или процесс принято, как уже отмечалось выше, рассматривать как сложную систему, движущуюся к заранее поставленной или объективно существующей цели

Это в полной мере относится к задачам принятия решений по управлению сложными системами, направленному на достижение определенной цели, а именно перевода объекта управления (ОУ) в заданное конечное состояние. При этом на каждом шаге движения к цели т.е. в каждом цикле управления ЛПР выбирает в условиях ограниченного времени решение о переводе ОУ в новое состояние, соответствующее заданному целенаправленному характеру его поведения.

Моделирование процесса управления как сложной системы последовательных событий с необходимостью требует принимать во внимание особенности сложных систем, в частности неизбежное присутствие в них неоднородных (векторных) связей [1,5]. Собственно, наличие неоднородных (векторных) связей является, наряду с эмерджентностью и робастностью, отличительным признаком сложной системы и ее неотъемлемым свойством.

Влияние неоднородных связей на принимаемые решения по выбору оптимальной альтернативы состоит в том, что улучшение одних характеристик системы неизбежно сопровождается ухудшением других. Иными словами, при анализе сложной системы обнаруживаются определенные пары существенных характеристик, для которых оказывается невозможным их одновременное улучшение.

Это обстоятельство накладывает серьезные ограничения на процессы моделирования сложных систем, в частности, отсюда вытекает принцип компромисса между точностью и сложностью синтезируемой модели [1]. Этот принцип отражает тот факт, что стремление построить точную модель посредством учета как можно большего количества свойств прототипа приводит к неограниченному нарастанию ее сложности. В полной мере с наличием неоднородных связей в системе связана известная проблема корректности критерия превосходства [1].

Возрастание сложности модели неотъемлемо связано с нарастанием степени неопределенности ситуации принятия решения. Универсальное множество альтернатив в условиях неопределенности принимается как однозначно не определенное т.е. может пополняться и видоизменяться в процессе выбора. Кроме того, принцип выбора оптимальной альтернативы также остается не формализованным.

Очевидно, что в случае, если оптимальную альтернативу не удалось априори включить в универсальное множество, то никакими приемами ее там выявить не удастся, и процесс пополнения универсального множества может продолжаться длительное время. Собственно говоря, это характерно для эволюции науки, когда от возникновения познавательной проблемы до генерации хотя бы удовлетворительной гипотезы проходят годы и десятилетия.

Универсальное множество альтернатив по определению может пополняться и видоизменяться с целью включения в него объективно оптимальной альтернативы. ЛПР выступает при этом в качестве так называемого «рационального оптимизатора», рассматривающего все возможные гипотезы и готового ограничиться эвристическим принципом разумной достаточности, т.е. остановиться на первом варианте, удовлетворяющем или превосходящем ожидания.

В связи с феноменом неопределенности обратим внимание на следующее обстоятельство. Характеризуя наиболее высокую степень неопределенности на начальном этапе решения познавательной (исследовательской) проблемы, можно утверждать, что модель ситуации у нас отсутствует, т.е. об объекте исследования ничего не известно. Однако это эквивалентно противоположному утверждению о необходимости принятия к рассмотрению априори неограниченного множества альтернативных моделей.

2.8.1. Проблематика общей задачи принятия решения

Рассмотрим процесс управления, в ходе которого ЛПР на основе сведений о текущем состоянии объекта управления (ОУ) и обстановки (окружающей среды) принимает в каждом цикле управления решение о выборе управляющего воздействия и его адекватного доведения до ОУ посредством передачи соответствующего сообщения.

$$S_{зпр} = \langle F_{ц}, S_{исх}, M_{сум}, A_{реш}, R, K \rangle, \quad (2.10)$$

где $S_{зпр}$ – символическое обозначение задачи принятия решения, $F_{ц}$ – цель принятия решения, $T_{доп}$ – допустимый промежуток времени на принятие решения, $S_{исх}$ – исходные сведения для порождения альтернативных вариантов решения (данные относительно состояний ОУ и обстановки), $A_{реш}$ – множество порожденных ЛПР альтернатив решения относительно применения к ОУ конкретного управляющего воздействия, R – выбранное решение, K – критерий (правило, на основе которого ЛПР выбирает оптимальное с его точки зрения решение).

Следует отметить, что в литературе, как правило, непосредственно вводится в рассмотрение множество альтернативных вариантов решения, предъявляемое для выбора, однако по существу каждый из них ориентирован на одну из множества моделей, генерируемых ЛПР для описания ситуации принятия решения. Поэтому представляется целесообразным дополнить кортеж (1) существенным элементом $M_{сум}$ – множеством альтернативных моделей, отображающих ситуацию принятия решения. Задача ЛПР в каждом цикле управления как раз и состоит в преобразовании синтезированной им модели ситуации в очередное управленческое решение.

В зависимости от конкретной ситуации возникает относительно широкий спектр частных задач принятия решения. В частности, ОУ может представлять собой техническую либо организационную систему, он может быть изолирован от окружающей среды либо находиться под ее воздействием, это воздей-

ствие может быть контролируемым или неконтролируемым со стороны ЛПР, ОУ может функционировать, развиваться и эволюционировать в условиях определенности, риска или неопределенности, доступное время на принятие решения может изменяться в широких пределах в зависимости от выполняемой функции управления (оперативное управление, планирование либо прогнозирование) и т.д.

2.8.2. Проблема определения цели принятия решения

Целью принятия решения может быть: перевод ОУ в заданную точку траектории в реальном или фазовом пространстве, его удержание на траектории, целенаправленное изменение структуры и/или поведения ОУ, его адаптация к условиям обстановки и др. Общее требование к процессу целеполагания состоит в том, что цель принятия решения должна быть определена предельно четко и конкретно. Очевидно, что расплывчатая, неопределенная дефиниция цели безусловным образом приводит к снижению эффективности управления.

Однако указанное требование носит общий, декларативный характер, и в каждом конкретном случае может быть выполнено с той или иной степенью соответствия желаемому. Действительно, цель, как модель будущего состояния ОУ и обстановки принято определять [1] как ситуацию или область ситуаций, которая должна быть достигнута к определенному моменту времени в результате выполнения процесса управления. Однако в силу фундаментальной неупорядоченности природы (окружающей среды) условия движения к цели, как правило, оказываются не полностью определенными. Достижение же в точности заданной ситуации (цели) возможно только в условиях полной определенности, когда процесс можно уверенно считать детерминированным на макроскопическом уровне.

Это означает, что в реальной практике управления выполняемая ЛПР процедура целеполагания должна априори предусматривать неполную определенность условий движения к цели и возникающие при этом риски.

При этом в случае качественной цели, для которой зафиксированы конкретный целевой эффект и оптимальный промежуток времени для его достижения, необходимо учитывать еще и ресурсные ограничения. В случае же количественной цели ЛПР, задавая численные характеристики целевого эффекта, в том числе, требуемую эффективность процесса управления, ориентируется на выполнение критерия оптимальности, однако допускает возможность ограничиться удовлетворением критерия пригодности [5].

Конкретно же в условиях возникающего при неполной определенности риска ЛПР будет выбирать стратегию, сопоставляя синтезированную им модель исходной ситуации с моделью, отражающую его видение целевой ситуации. Возникает характерная задача «игры с природой», в которой ЛПР перебирает

широкий спектр критериев оптимальности [15] в соответствии со своей системой предпочтений и отношением к риску.

2.8.3. Проблема наблюдаемости объекта управления

В общем случае исходные данные для порождения альтернатив складываются из двух составляющих: данные относительно текущего состояния ОУ и данные относительно состояния обстановки. В совокупности они характеризуют *ситуацию принятия решения* в каждом цикле управления. Следовательно, исходные данные можно записать как кортеж — двойку:

$$S_{исх} = \langle S_{оу}, S_{об} \rangle, \quad (2.11)$$

где $S_{оу}$ и $S_{об}$ - данные о состоянии ОУ и обстановки соответственно к моменту принятия очередного решения. Полнота и точность этих данных отражают степень *наблюдаемости* ОУ.

Поскольку ОУ «отрабатывает» как управляемые воздействия ЛПР, так и неуправляемые воздействия окружающей среды, его внутреннее состояние в очередном цикле управления будет функцией этих воздействий. Обозначим X - множество *управляемых* воздействий и N - множество *неуправляемых* воздействий. В совокупности они образуют множество *управляющих* воздействий $X^* = \langle X, N \rangle$. В общем случае множество управляющих воздействий порождает в каждом цикле управления ОУ множество его внутренних состояний Z , которое, в свою очередь, порождает множество выходных сигналов Y . По тем или иным причинам для ЛПР наблюдаемым оказывается некоторое подмножество Y^* выходных сигналов, поскольку некоторые выходные сигналы для ЛПР могут оказаться не наблюдаемыми, а некоторые из них ЛПР может при анализе счесть несущественными и исключить из рассмотрения.

Модель, отображающая поведение ОУ как системы, может быть представлена кортежем из шести объектов:

$$S_a = \langle x, n, y, z, f, g \rangle, \quad (2.12)$$

где $x = x(t)$ – управляемый входной сигнал как конечное множество функций времени; $n = n(t)$ – неуправляемый входной сигнал (внешнее воздействие) как конечное множество функций времени; $y = y(t)$ - выходной сигнал как конечное множество функций времени; $z = z(t)$ - переменная внутреннего состояния – множество функций, определяющих значения выходных сигналов $y(t)$; f и g – функционалы, задающие текущие значения выходных характеристик и внутреннего состояния ОУ.

Состояние ОУ в каждый момент времени характеризуется множеством переменных z_i , меняющихся вследствие внутренних возмущений (флуктуаций), управляемых и неуправляемых воздействий. При этом переменные состояния $z(t)$ в общем случае могут быть неизвестны, и судить об их физической природе и величине оказывается затруднительным. Выходные же переменные $y(t)$ являются конкретными физическими величинами, они, как правило, наблюдаемы и измеряемы. Поэтому определение состояния

ОУ в каждом цикле управления в большинстве случаев оказывается осуществимым именно в пространстве выходных переменных.

Формальное определение произвольного внутреннего состояния ОУ возможно только в том случае, если в результате измерения выходных переменных $y(t)$ при известных значениях управляемых входных переменных $x(t)$ может быть получена достоверная оценка любого внутреннего состояния $z(t)$.

Таким образом, необходимое и достаточное условие полной наблюдаемости ОУ состоит в том, что каждый элемент $y(t)$ при фиксированных значениях t и $x(t)$ имеет в качестве прообраза единственный элемент $z(t)$. Это означает, что каждому состоянию ОУ должно соответствовать одно и только одно значение выходной переменной. Следовательно, должно существовать отображение, обратное уравнению наблюдения (4), которое позволяет воспроизводить внутренние состояния объекта управления по наблюдаемым выходным характеристикам, порождаемым этими внутренними состояниями:

$$g^{-1}: y(t) \rightarrow z(t).$$

Благодаря наличию такого обратного преобразования выходные переменные могут быть использованы в качестве характеристики наблюдаемого текущего состояния объекта управления. Иными словами, при *полной наблюдаемости* объекта управления всегда имеется возможность определения внутреннего состояния ОУ по результатам измерения его выходных характеристик. В этом и состоит решение обратной задачи управления.

На практике весьма важным для обеспечения полной наблюдаемости ОУ является определение необходимого и достаточного набора элементов (контрольных точек), в которых производится измерение существенных выходных характеристик. В технических системах функция контроля, включающая операции наблюдения, классификации и идентификации состояний ОУ, обеспечивается соответствующими измерительными приборами и устройствами. В организационных системах ответственность за достоверность, полноту и точность данных о состоянии системы с управлением лежит на ЛПР объекта управления.

В случае, если ОУ изолирован от воздействий среды задача ЛПР существенно упрощается. Действительно в этом случае ЛПР, в принципе, известны структура и поведение ОУ, т.е. закон его функционирования:

Если при этом решена обратная задача управления, и ОУ можно считать полностью наблюдаемым, то ЛПР известен также алгоритм (механизм) функционирования ОУ, т.е. способ обеспечения наблюдаемого закона функционирования. Это означает, что ЛПР владеет уже не только *данными*, но и *знанием* закономерности функционирования (поведения) ОУ, позволяющим обеспечить высокую вероятность выбора оптимальных решений в каждом цикле управления вплоть до достижения цели.

При этом поведение ОУ можно считать детерминированным с точностью до его внутренних флукту-

аций и рассматривать задачу управления ОУ в условиях *определенности*.

В общем случае, когда влиянием обстановки на состояние ОУ пренебречь невозможно, а также, когда объектом управления является сложная организационная или организационно-техническая система, ОУ нельзя считать полностью наблюдаемым, и задача управления переходит в условия *риска*.

2.8.4. Проблема наличия ресурсов управления

В качестве отдельного самостоятельного ресурса выступает время, которым располагает ЛПР для принятия решения. Естественно, чем больше времени отпущено на принятие решения, тем больше шансов, что будет найдено наиболее удачное, т.е. оптимальное решение. При этом неизбежно возникает оптимизационная задача, в которой целевой характеристикой является качество решения, т.е. степень его соответствия реальному состоянию ОУ и обстановки, а лимит времени играет роль ограничения.

Время, которым располагает ЛПР на принятие решения $T_{доп}$, характеризует оперативность управления и выделяется в самостоятельный ресурс, поскольку, в силу неоднородной (векторной) связи между оперативностью и ресурсоемкостью, оптимизация соотношения время/ресурсы представляет собой непрямую задачу обеспечения эффективности процесса управления в зависимости от целей и предпочтений ЛПР.

Очевидно, что значение $T_{доп}$ существенным образом зависит от выполняемой ЛПР функциональной задачи управления. Задача *оперативного управления*, как правило, выполняется в реальном времени, когда решение должно приниматься незамедлительно с изменением обстановки.

Задача *планирования*, имеющая целью снятие неопределенности относительно структуры и поведения ОУ, а также состояния обстановки, возникает при существенных изменениях условий функционирования ОУ, препятствующих продолжению оперативного управления. Как функцию управления, планирование принято делить на тактическое и стратегическое. Поэтому значение $T_{доп}$ при выполнении планирования может находиться в широких пределах, оставляя, тем не менее ЛПР возможность обстоятельного анализа ситуации принятия решения.

Функция *прогнозирования* имеет целью получение научно обоснованного суждения о возможных состояниях ОУ и обстановки в достаточно отдаленном будущем, а также об альтернативных вариантах и сроках достижения предполагаемого целевого состояния. Очевидно, что ценность достоверного прогноза, как и цена ошибочного, чрезвычайно велика. Поэтому для получения важных прогнозов нередко используются такие особо трудоемкие и дорогостоящие процедуры коллективной экспертизы, как метод Дельфи [16].

Остальные ресурсы $P_{рес}$, необходимые для принятия решения, часто рассматриваются в интегральном

виде. В случае необходимости производится декомпозиция ресурсов на отдельные составляющие: материальные, финансовые, человеческие (трудовые), интеллектуальные, информационные, расчетные, вычислительные и др.

Следует отметить, что в условиях инновационной экономики в качестве ресурсов рассматриваются в первую очередь интеллектуальные ресурсы (знания ЛПР) вкуче с вычислительными ресурсами информационных систем поддержки принятия решений (СППР) и лишь во вторую – финансовые ресурсы, которые могут быть направлены, в частности, для оплаты работы эксперта (коллегии экспертов) или команды системного аналитика.

В конечном итоге *качество* сведений, используемых ЛПР для принятия решения (в первую очередь, их достоверность, полнота и точность) определяет *ценность* сообщения, выражающего суть принятого решения, с точки зрения его использования по назначению, т.е. для реализации управляющего воздействия по переводу ОУ в очередное требуемое состояние.

2.8.5. Проблема свободы выбора решения

Одна из базовых аксиом теории управления определяет обязательную необходимость наличия у ЛПР свободы выбора решения (управляющего воздействия) на множестве допустимых альтернатив. Обычно рассматривается два аспекта проблемы [1]. Прежде всего утверждается, что чем меньше это множество, тем ниже эффективность управления, поскольку в условиях действия ограничений оптимальные альтернативы (решения) часто оказываются за пределами области адекватности. С другой стороны, подчеркивается, что отсутствие (или исчерпание) ресурсов управления эквивалентно отсутствию свободы выбора решения.

Однако, если учитывать имеющийся у ЛПР ограниченный ресурс времени, возникает определенное противоречие. С одной стороны, действительно, целесообразно расширять генеральное множество альтернатив, повышая тем самым вероятность включения в него объективно оптимальной альтернативы. Однако, с другой стороны, необходимо обеспечить условие $T_{рес} \leq T_{доп}$, т.е. принять решение и довести его до ОУ до исчерпания отведенного ресурса времени. В частности, в условиях оперативного управления, как уже отмечалось, этот ресурс крайне ограничен. В условиях выполнения функций планирования и прогнозирования он тоже не безграничен.

Следовательно, мы возвращаемся к оптимизационной задаче, решая которую ЛПР стремится всемерно пополнить генеральное множество альтернатив, а лимит времени вынуждает его это множество ограничивать. Впрочем, возможны ситуации, когда ЛПР предпочтет предельно сократить промежуток времени на формирование множества альтернатив, а снижение вероятности выявления оптимальной альтернативы будет его в этом стремлении ограничивать.

Следует обратить внимание на еще один немаловажный аспект этой проблемы. Дело в том, что в условиях риска и неопределенности свобода выбора решения для ЛПР оказывается теснейшим образом связана с его отношением к риску. Выбор критерия K – см. кортеж (3.17) определяется таким образом индивидуальной системой предпочтений конкретного ЛПР. Кроме того, при выборе критерия ЛПР учитывает цель и значимость выполняемой операции, имея в виду, что в одних ситуациях необходим гарантированный результат, а в других – допустим определенный риск.

В частности, практика принятия решений в условиях статистической неопределенности [18] базируется на возможности выбора критериев оптимальности в широком интервале отношений оптимизм-пессимизм. При этом свобода выбора решения на множестве альтернатив, как правило, сводится к свободе выбора того или иного критерия оптимальности, в частности, критерия Гурвица [17].

Из практического опыта поиска информации для принятия решений в условиях неполной определенности следует, что выявление и накопление необходимых (актуальных) данных происходит, как правило, с экспоненциальным замедлением [19]. Поэтому в силу наличия лимита времени во многих случаях решение приходится принимать задолго до перевода задачи в условия определенности. Как следствие, ЛПР оказывается вынужденным к моменту принятия решения (выбора стратегии) использовать, наряду с детерминированными сведениями, вероятностные оценки и интуитивные соображения [19]. Естественным образом возникает задача оценивания (измерения) качества решений и связанной с ним эффективности процесса управления [21].

2.8.6. Проблема управляемости объекта управления

Под управляемостью ОУ принято понимать его способность переходить в пространстве состояний под действием управляющих воздействий из любого текущего состояния в требуемое для данного цикла управления состояние. Тем самым предполагается, что в отношении ресурсов управления ЛПР должен выполняться принцип необходимого разнообразия Эшби [20] в том смысле, что ЛПР не должен допустить потери управляемости вследствие отсутствия в той или иной ситуации необходимого управляющего воздействия. При этом имеется в виду не только возможность рационального изменения существенных параметров функционирования ОУ для его удержания на траектории, ведущей к цели в условиях дестабилизирующих внутренних и внешних случайных событий (задача слежения). В процессе достижения цели, особенно в условиях неполной определенности может потребоваться изменение структуры и поведения ОУ, механизма и алгоритмов его функционирования, развития и эволюции.

Один из важных аспектов проблемы управляемости связан с управлением сложными организационными и организационно-техническими системами,

обладающими разветвленной иерархией. В таких системах управляемость ОУ различных уровней иерархии в значительной степени связана с решениями оперативного характера, принимаемыми на нижних уровнях иерархии при выполнении стратегических и тактических решений, поступающих с верхних уровней. Поэтому на первый план выдвигаются такие функции управления, как организация и координация, а также функции управления, связанные с учетом человеческого фактора, в частности, мотивация и стимулирование персонала.

При этом возникает проблема определения ценности информации, точнее сообщений, которыми обмениваются субъекты информационных процессов [8]. Для ЛПР верхних уровней иерархии критически важно использовать для принятия решений достоверные сведения (ценную информацию), отсеивая компоненты сообщений, несущие информационный шум и дезинформацию [2,7]. В противном случае возникает положительная (усиливающая) обратная связь, приводящая к нарастанию степени несоответствия принимаемых решений реальному состоянию обстановки.

Выбор решений, связанных с реализацией таких управленческих функций, особенно в случаях, требующих оперативного решения, принуждает ЛПР применять эвристические процедуры, что и приводит к снижению вероятности нахождения оптимального решения.

3. Выбор решений в условиях статистической неопределенности

3.1. Современное состояние проблемы

В большинстве задач экономико-финансовой и управленческой деятельности появляется необходимость принимать взвешенные решения, касающиеся будущего состояния объектов управления и обстановки. При этом вся сложность выбора решения заключается в том, что множество финансово-экономических задач, в основном, обладают неопределенностью в том либо ином виде. Скорее всего, правильным будет утверждением о том, что принятие решений с учетом неопределенностей разного типа – это общий случай, а вот выбор решения, который полностью абстрагирован от этого фактора, по сути является частным случаем реальной практики управления. Действительно, детерминированные ситуации принятия решения, в которых отсутствует риск нежелательных последствий, представляет собой скорее исключение, чем правило в задачах рассматриваемого типа.

Сегодня, существует довольно широкая база споров математической формализации постановки подобных задач с учетом неопределенности ситуации принятия решения и порождаемого ею риска. Важно помнить, что такая методология – не гарантирует разрешение проблемы, а только рекомендует правило выбора в тех или иных условиях. Принять итоговое решение всегда в праве сам человек, который способен услышать собственную интуицию, применить «здравый смысл» в любой ситуации, привлечь

метод аналогии, выслушать мнения экспертов независимых организаций, опереться на собственный либо чужой опыт. Поэтому, можно сказать, что принятие решений по большей мере носит субъективный характер, нежели объективный. Но, принимать экономические и управленческие решения в сфере бизнеса, технологии производства, опираясь только на свой жизненный опыт, интуицию, здравый смысл, как правило, будет ошибочно.

Использование математических методов способствует осуществлению критического анализа микро-финансовой ситуации, что значительно облегчает процесс выбора для лица, принимающего решение. В результате этого, конкретная политика и стратегия поведения проводятся наиболее обоснованно, а главное последовательно.

Обсуждаемые неопределенности бывают разных типов. К примеру, когда две противоборствующие стороны принимают участие в парных антагонистических ситуациях, то существует некая неопределенность, суть которой состоит в том, что ни одна из этих сторон ничего не знает о действиях соперника. И все же, подобная неопределенность компенсируется тем предположением сторон, что противник выполняет свои действия осознанно, подбирая необходимые стратегии, которые ему выгодны. Другими словами, все антагонисты стараются нацелить линию своего поведения на повышение собственного выигрыша.

Но, в принятии экономических решений главным элементом все же считается неопределенность другого типа, которая никаким образом не связана с осознанным целенаправленным противодействием соперника. Она скорее заключается в том, что лицо, принимающее решение (ЛПР), обладает недостаточным количеством информации об объективных условиях, в которых оно принимается и которые станут известны только после принятия и реализации решения. Подобная неопределенность зависит от целого ряда переменных факторов, таких как: нестабильность экономической ситуации, надежность партнера, экологическая обстановка, покупательский спрос на конкретный вид товара, уровень инфляции. Также сюда может быть включена рыночная конъюнктура, стихийные бедствия, политическая ситуация, налоговая политика, ситуация на бирже, курс валют, объем перевозок, техногенные катастрофы.

Выбор решения в таких задачах находится в прямой зависимости от действующей реальности, которую в математической модели попросту называют «природой», саму модель – «игрой с природой», а заинтересованные стороны – «игроками».

В математической модели действия осознанного характера предпринимает лишь один из участников и если сказать точнее, то лицо, которое собственно и принимает решение (ЛПР) – пусть оно будет обозначено через A . Природа (P), является игроком номер два. Но что существенно, так это то, что она выступает ни как противник, ни как союзник участника A . Ведь определенная таким образом природа не имеет возможности совершать злонамеренные поступки против участника A ровно так же, как и быть с ним

заодно. Игрок P не стремится к поставленной цели, он с полным безразличием относится к исходу игры, так как принимает любое из своих состояний неопределенным образом. Игрок A не способен оказать на состояние P никакого влияния. Именно поэтому A в игре с природой назвали статистиком, а вот сама теория игр с природой получила название «теории статистических решений».

Все неопределенности, которые сопутствуют играм с природой, классифицируются по определенному признаку, а именно по их отношению к самой случайности. Таким образом, у ЛПР существует возможность различать стохастическую или, другими словами, вероятностную неопределенность. В этом случае, неизвестные факторы отличаются статистической устойчивостью и являются простыми объектами теории вероятностей. В иной ситуации, когда закон распределения вероятностей отсутствует, ЛПР вынужден считать все события равновероятными и у него не существует никаких предположений о стохастической устойчивости. Еще одна разновидность статистической неопределенности возникает в случаях, когда закон распределения вероятности существует, но ЛПР он неизвестен. В этом случае, полагаясь на определенные гипотезы о законах распределения вероятностей состояний природы, собственно и принимаются решения. Причем, необходимо осознавать весь риск того, что принятое решение может не соответствовать реальным условиям, поскольку ЛПР, принимая решение, руководствуется той моделью ситуации (состояния объекта управления и обстановки), которую ему удалось синтезировать к моменту принятия решения.

В теории игр с природой важным предположением считается то, что в любое время P может быть только в одном из своих состояний (n) P_1, \dots, P_n , другими словами, состояния природы поделены временем между собой.

Конечно же, абсолютно все состояния природы необходимо описывать качественно и содержательно. Совокупность состояний P обозначается так: $S_P = \{P_1, \dots, P_n\}$ и формируется на базе уже имеющегося опыта анализа этих состояний или же как следствие предположений экспертов.

В том случае, если отталкиваясь от состояний природы P_1, \dots, P_n известны вероятности q_1, \dots, q_n , либо же была принята любая из гипотез о распределении таких вероятностей, то тогда говорится о «принятии решения в условиях риска». Также, важно, чтоб лицо, которое собственно и принимает решение, доверительно относился к таким вероятностям.

Исходя из того, что P в любой из моментов находится лишь в одном из собственных состояний, то все ситуации, которые состоят в том, что природа находится именно в $P_j, j=1, \dots, n$ состоянии, будут случайными, несовместимыми и создадут отдельную группу. По этой причине, сумма вероятностей подобных событий будет приравняться к значению единицы (полная группа событий).

Если вероятность определенного состояния природы будет равна 0, то ее можно не рассматривать,

так как в процессе анализа она не сыграт никакой существенной роли.

Поэтому, на вероятности q_1, \dots, q_n в состоянии природы P_1, \dots, P_n будут накладываться следующие условия:

$$q_j > 0, j = 1, \dots, n, \sum_{j=1}^n q_j = 1. \quad (3.1)$$

Если эти вероятности неизвестны и не удастся никаким образом такие статистические данные добыть, то часто можно услышать о «принятии решения в условиях абсолютной неопределенности».

В случае, когда ЛПР, выражает свое отношение к известным вероятностям с долей определенного доверия, то можно сказать, что «решения принимаются в условиях «полунеопределенности».

Большинство событий экономико-социального характера, при которых важно выбрать решение, показывают, что в них проявляется взаимодействие между заинтересованной стороной (ЛПР) и природой. Сторона, которая принимает решение, чтобы достичь поставленной цели, может выполнять различные управляющие действия, стремясь использовать оптимальные методы выбора на множестве альтернатив. Подобные ситуации в практике «игры с природой», можно охарактеризовать следующим образом:

1. Заинтересованная сторона (фирмы, компании, экономико-финансовые союзы, потребители, торгово-таможенные организации).

2. Список и объяснение планируемых действий, выполненные в форме качественного (концептуального) описания. Сюда входят: подбор дивидендной политики, объемов выпуска и потребления, заключенные договоры, методы комплектования портфеля инвестиций, а также невозможность допуска определенных товаров на рынок, согласно экономическим либо политическим соображениям.

3. Конечная цель (удовлетворение финансовых и экономических потребностей человека, монопольные прибыли, распродажа на внешнем рынке избыточного товара, вытеснение основных конкурентов, увеличение капиталов казны).

4. Наличие внешней среды (природы) и детальное описание качества ее вероятных состояний (спрос на разнообразные услуги и товары, анализ показателей инфляции, которые могут возникнуть, погодные условия, направления в развитии экономической политики).

5. Возможные показатели вероятностей состояния природы (при учете конкретных поставленных условий).

6. Возможность получения оценки (количественный метод) принятого решения заинтересованной стороной, учитывая абсолютно все вероятные состояния природы.

Довольно сложной задачей является выбор заинтересованной стороной (ЛПР) линии поведения в реальных ситуациях (под ситуацией понимается состояние объекта управления и обстановки к определенному моменту времени). При построении математической модели в соответствии с методологией системного анализа не учитываются несущественные факторы, а также существенно ограничивается протекание игры с природой конкретными правилами.

Это дает возможность заинтересованной стороне проводить анализ поставленной задачи прежде, чем принять наиболее подходящее решение.

Каждое упорядоченное действие, которое допустимо в игре с природой со стороны игрока A , имеет определенное название – стратегия. В том случае, когда данный участник игры самостоятельно выбирает стратегию, ее называют «чистой».

Но, все же, самыми характерными считаются состояния природы, идентифицированные со случайным характером наступления событий. Как правило, закон распределения их вероятностей остается неизвестным. Оптимальность принятого решения в таком случае будет основываться на поиске стратегии с использованием тех или иных критериев. Выбор критерия отражает отношение того или иного ЛПР к риску, неизбежно возникающему в условиях неполной определенности. Ситуация усугубляется необходимостью принимать решения в условиях ограниченного промежутка времени.

3.2. Основные критерии выбора стратегий в «игре с природой»

Наиболее прочно закрепились в теории и практике принятия решений, следующие критерии: Сэвиджа, Вальда, максимакса, Лапласа, а также комбинированный критерий Гурвица.

Критерии Вальда и максимакса способны соответственно отражать предельную степень пессимизма и оптимизма игрока A , при условии, что он рассматривает только ожидаемые выигрыши, т.е. они находятся абсолютно на противоположных смысловых полюсах проявления соотношения оптимизм/пессимизм. Несмотря на то, что они весьма популярны и находят широкое применение в практике принятия решений, каждый из них имеет очевидные слабые стороны. В частности, критерий Вальда часто упрекают в чрезмерно большой осторожности, которая значительно ограничивает сферу его использования. А критерий максимакса, как предельно оптимистичный, напротив, приводит к немотивированной и легкомысленной оценке ситуации принятия решения.

Что касается критерия Сэвиджа, то он оценивает ситуацию принятия решения с точки зрения возникающего риска. Как и критерий Вальда, его относят к числу осторожных критериев, поскольку он отражает сожаление ЛПР по поводу упущенных благоприятных возможностей. ЛПР, отдавая предпочтение выбору по критерию Сэвиджа, гарантирует себе наименьший риск независимо от состояний природы.

Что касается критерия Лапласа [18], то он в статистическом смысле отражает более оптимистичное отношение ЛПР к ситуации выбора решения в условиях неполной определенности и риска.

Довольно часто складываются ситуации, в которых отсутствует возможность определить вероятности состояний природы. Поскольку нет оснований утверждать, что вероятности состояний различны, то можно допустить, что они равновероятны. Этот

принцип называется «принципом недостаточного основания», на котором основан критерий Лапласа. В работе [23] показано, что критерии Лапласа оптимальности чистых стратегий относительно рисков и относительно выигрышей эквивалентны.

В надежде на получение взвешенной промежуточной оценки ситуации в виде баланса между экстремальными и противоположными по семантике критериями, в 1951 году Л. Гурвиц предложил свой критерий [19]. Он вошел в теорию и практику выбора стратегий как критерий Гурвица. Этот критерий весьма распространен и безусловно полезен, но и он не может рассматриваться как универсальный. Дело в том, что использование критерия Гурвица в значительной степени ограничено выбором на множестве из двух альтернатив и не гарантирует возможности их сопоставления с другими классическими критериями в реальном времени.

Основательное теоретическое исследование выигрыш-критерия Гурвица проведено Л.Г. Лабскером в серии работ [17] и в монографии [18]. Им показано, что основное предназначение этого критерия состоит во взвешенном *сглаживании* крайнего пессимизма критерия Вальда и крайнего оптимизма максимаксного критерия. Однако сформулированная в работах [21,24-26] проблема сглаживания выигрыш-критерия Гурвица и поэтапное её решение показали, что феномен сглаживания не всегда возможен. В этих работах были найдены достаточные и необходимые условия на игру, при которых выигрыш-критерий Гурвица не обладает свойством сглаживания, и, следовательно, применять его для отыскания оптимальных стратегий в этой игре нецелесообразно. Очевидно, что эти важные теоретические результаты качественного характера нуждались в количественном статистическом подтверждении и обосновании, которые были получены в работах И.С. Клименко с сотрудниками [27-30].

Кроме того, анализ литературы показывает, что большинство используемых критериев тяготеют в сторону выбора осторожных решений. Поэтому важной задачей представляется поиск и формирование критериев, ориентированных на выбор умеренно и/или существенно оптимистичных решений в задаче игры с природой.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о том, что совершенствование существующих и разработка новых чувствительных инструментов поддержки принятия многокритериальных решений в условиях неопределенности являются важной и актуальной задачей.

3.3. Ранжирование классических критериев по степени их оптимизма

Выше была подтверждена ограниченная возможность использования критерия Гурвица для взвешенного выбора альтернатив в задаче «игры с природой». В этой связи в [28] было обращено внимание на необходимость формирования порядковой (ранговой) шкалы оптимизма критериев, наличие которой представляется весьма полезным для ЛПР.

Проведенное в работе [30] ранжирование четырех классических критериев показывает следующее отношение нестрогого порядка:

$$K_W \prec K_S \prec K_L \prec K_M. \quad (3.2)$$

Здесь использованы следующие обозначения: K_W , K_S , K_L и K_M – критерии Вальда, Сэвиджа, Лапласа и максимакса соответственно, знак \prec означает «менее предпочтителен». В общем случае эти критерии связаны между собой отношением «менее (более) оптимистичен или эквивалентен», что допускает реализуемую на практике возможность эквивалентности всех рассматриваемых критериев (выбор всеми критериями одной и той же оптимальной альтернативы).

В [29] группа критериев, ранжируемых на порядковой шкале оптимизма, была дополнена критерием произведения K_P и новым критерием существенного риска K_R , сформированного на трансформированной матрице риска. В результате было установлено следующее отношение нестрогого порядка:

$$K_W \prec K_S \approx K_P \prec K_L \prec K_R \prec K_M, \quad (3.2)$$

где \approx означает эквивалентность критериев Сэвиджа и произведения.

На рис. 2 приведены значения коэффициентов парной ранговой корреляции шести выделенных критериев с критерием максимакса.

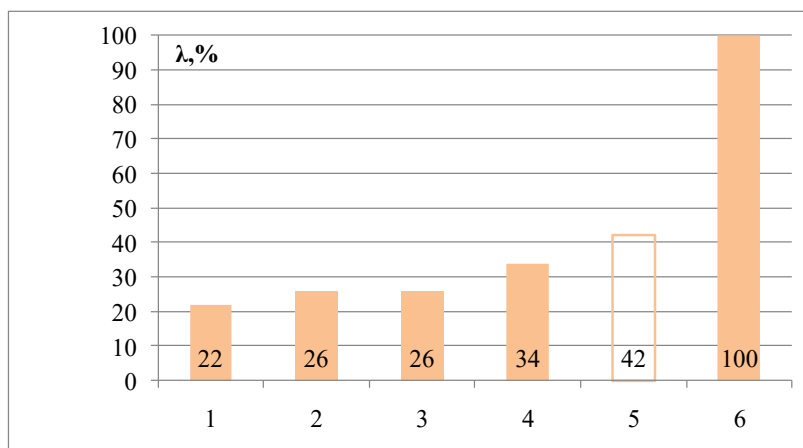


Рис. 2. Корреляции выделенных критериев с критерием максимакса [28] 1 – $\lambda_{M-V}=0,22$; 2 – $\lambda_{M-S}=0,26$; 3 – $\lambda_{M-P}=0,26$; 4 – $\lambda_{M-L}=0,34$ 5 – $\lambda_{M-R}=0,42$; 6 – $\lambda_{M-M}=1,0$

Как видим, имеет место, в достаточной мере, плавное возрастание значений коэффициентов парной корреляции, при эквивалентности критериев Сэвиджа и произведения. Устойчивость выявленного порядка по проявлению степени оптимизма

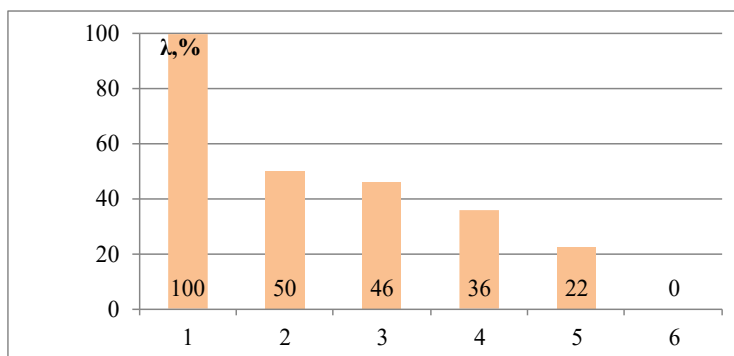


Рис. 3. Корреляции выделенных критериев с критерием Вальда [30] 1 – $\lambda_{V-V}=1,0$; 2 – $\lambda_{S-V}=0,5$; 3 – $\lambda_{P-V}=0,46$; 4 – $\lambda_{L-V}=0,36$; 5 – $\lambda_{M-V}=0,22$; 6 – $\lambda_{R-V}=0$

Как видим, сформированная группа критериев демонстрирует устойчивое отношение нестрогого порядка, что позволило предложить дополнительный умеренно рискованный критерий и ранговую шкалу для управления риском выбираемых стратегий в зависимости от конкретных при принятии решения, который может в большей степени отвечать системе его предпочтений по отношению к риску в тех или иных конкретных ситуациях.

3.4. Ранжирование критериев выбора решений, сформированных на матрице риска

Проведенное в [30] оценивание критериев сформированных только на матрице риска, показывает, что их взаимная корреляция имеет хаотический характер, что не позволяет их непротиворечиво упорядочить. Это обстоятельство, свидетельствует о необходимости серьезного исследования семантики рискованных критериев, в том числе, с точки зрения целесообразности формирования дополнительной шкалы, альтернативной шкале оптимизма критериев, предложенной в работах [27,28], а также объединения критериев эффективности и риска на комбинированной порядковой шкале, которая будет обладать более высокой чувствительностью по сравнению с ранее предложенными шкалами. Применительно к перспективе разработки и использования такой шкалы представляется целесообразным использование характеристики *осторожности критериев*, пригодной для критериев обеих рассматриваемых групп.

Поэтому представляет интерес оценивание возможности построения дополнительной (альтернативной) ранговой шкалы для измерения риска ЛПР при принятии решения в условиях статистической неопределенности.

Для выполнения этой задачи рассмотрим следующие критерии, сформированные на матрице риска: максимакса риска (K_{MR}), существенного риска (K_R), усредненного (среднего) риска (K_{AR}), максимина (K_{Mm}) и хорошо известный минимаксный критерий

подтверждается результатом ранжирования выделенных критериев по степени их парной корреляции с критерием Вальда, т.е. в обратном порядке (рис. 3).

Сэвиджа (K_{mM}).

Формально новые критерии, сформированные на матрице риска, могут быть представлены следующим образом.

Критерий максимакса риска:

$$K_{MR} = \max_i \max_j \Delta x_{ij}. \quad (3.3)$$

(Δx_{ij} – разность между максимальной и текущей оценками в каждом столбце матрицы риска)

Критерий минимакса риска (Сэвиджа):

$$K_S = \min_i \max_j \Delta x_{ij}. \quad (3.4)$$

Критерий усредненного риска:

$$K_{AR} = \max_i \left(\frac{1}{n} \Delta x_{ij} \right). \quad (3.5)$$

Критерий максимина риска:

$$K_{Mm} = \max_i \min_j \Delta x_{ij}. \quad (3.6)$$

Критерий минимина риска:

$$K_{mm} = \min_i \min_j \Delta x_{ij} \quad (3.7)$$

Коэффициенты парной ранговой корреляции рассчитывались на выборке из 150 матриц риска, сконструированных из исходных матриц эффективности. Приведен на рис.3. в качестве примера четыре характерные матрицы риска, на которых в явном виде проявляется их существенная особенность, которая состоит в существовании значительного количества элементов с нулевыми значениями. Это обстоятельство является естественным следствием способа расчета таких матриц, предложенного Л. Сэвиджем в известной работе [31].

Как будет показано ниже, следствием указанной особенности матриц риска оказывается существенное отличие закономерностей взаимной корреляции критериев риска от известных данных, полученных И.С. Клименко с сотрудниками для матриц эффективности.

Для выполнения объемной работы по расчету коэффициентов парной ранговой корреляции было разработано специальное программное обеспечение, реализованное на языке программирования Python 3, с использованием библиотек статистической обработки данных, таких как NumPy и Pandas. Данное программное обеспечение существенно расширило

возможности по оперативной обработке исходных матриц эффективности и риска в ходе проведения данной исследовательской работы.

Расчет степени взаимной корреляции введенных рисков критериев с классическими критериями и между собой дал следующие результаты:

1. Коэффициенты взаимной корреляции критерия рискового максимакса со всеми остальными критериями: $\lambda_{MR-AR} = 0,41$; $\lambda_{MR-Mm} = 0,26$; $\lambda_{MR-S} = 0$; $\lambda_{MR-mm} = 0,6$.

2. Коэффициенты взаимной корреляции критерия усредненного риска со всеми остальными критериями: $\lambda_{AR-S} = 0$; $\lambda_{AR-W} = 0$; $\lambda_{AR-MR} = 0,41$; $\lambda_{AR-Mm} = 0,56$.

3. Коэффициенты взаимной корреляции критерия Сэвиджа (минимакса риска) со всеми остальными критериями: $\lambda_{S-MR} = 0$; $\lambda_{S-AR} = 0$; $\lambda_{S-Mm} = 0,15$.

4. Коэффициенты взаимной корреляции критерия максимина риска со всеми остальными критериями: $\lambda_{Mm-S} = 0,15$; $\lambda_{Mm-AR} = 0,56$; $\lambda_{Mm-mm} = 0$; $\lambda_{Mm-MR} = 0,26$.

5. Коэффициенты взаимной корреляции критерия минимина риска со всеми остальными критериями: $\lambda_{mm-MR} = 0,6$; $\lambda_{mm-AR} = 0,37$; $\lambda_{mm-Mm} = 0$.

Прежде всего, анализ указанных результатов, показал, что для всей группы рисков критериев характерно *полное отсутствие* случаев совпадения выбора оптимальной альтернативы всеми критериями. При этом имеет место совпадение выбора по четырем критериям (около 25% случаев) и, естественно, по трем и четырем критериям.

Этот нетривиальный результат существенно отличается от статистических закономерностей взаимной корреляции классических критериев, эмпирически установленных в работах [31, 32], в которых на

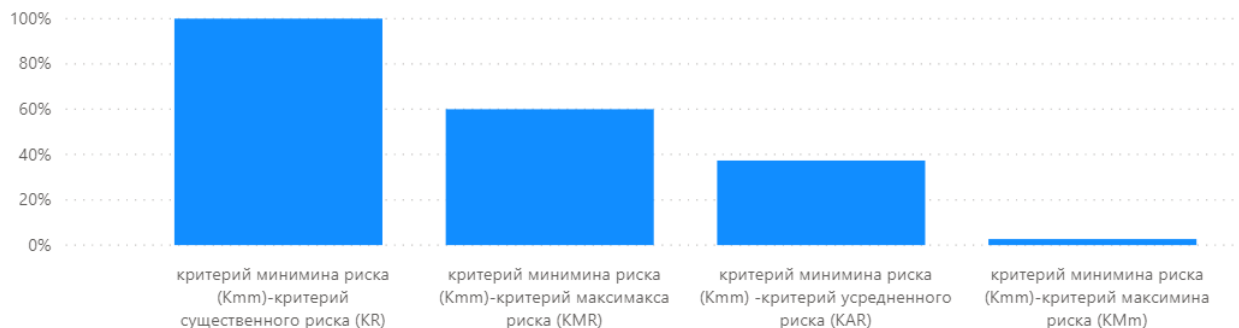


Рис. 4. Корреляции выделенных критериев с критерием минимина риска. $\lambda_{mm-R} = 0,9$; $\lambda_{mm-AR} = 0,37$; $\lambda_{mm-Mm} = 0$, $\lambda_{MR-mm} = 0,6$

Полученные результаты представляют существенный интерес с точки зрения постановки и решения задачи формирования комбинированной ранговой шкалы, формируемой с привлечением расширенной системы критериев, объединяющих критерии и эффективности, и риска в порядке изменения степени их осторожности / неосторожности.

Насыщение такой шкалы расширенным множеством критериев, характеризующих индивидуальными показателями осторожности (при сохранении начала и конца отсчета позволит заметно увеличить

4. Заключение

1. Проведен статистический корреляционный анализ выборки из 150 матриц риска с установлением значений парной ранговой корреляции

основе двух независимых подходов было обнаружено около 22% случаев совпадения выбора одной альтернативы пятью классическими критериями.

Как известно, Л. Лабскером [18] теоретически показано, что стратегия, оптимальная по максимумному критерию, оптимальна и по миниминному критерию. При этом, однако подчеркивается, что обратное утверждение не верно, т.е. существуют игры с природой, в которых существует стратегия, оптимальная по миниминному критерию, но не оптимальная по максимумному критерию.

Анализ результатов нашего корреляционного анализа показал, что коэффициент взаимной ранговой корреляции этой пары критериев $\lambda_{MR-mm} = 0,9$.

Это значение, полученное на репрезентативной выборке из 150 матриц риска можно рассматривать как эмпирическое подтверждение этого теоретически обоснованного положения. Тот факт, что λ_{MR-mm} все-таки несколько отличен от единицы можно отнести к указанной как раз и связано с тем, что стратегия, оптимальная по максимумному критерию, не обязательно оптимальна по миниминному критерию.

Объединим рассматриваемые рисковые критерии на пробной ранговой шкале риска, упорядочив их по мере уменьшения степени их взаимной корреляции с критерием минимина риска, который является критерием крайней оптимизма (или крайней неосторожности) относительно рисков.

На рис. 4 приведена столбчатая диаграмма, отражающая упорядоченное изменение коэффициентов парной корреляции критерия минимина с другими рисковыми критериями

пяти практически используемых критериев риска.

2. Статистически достоверно установлено что для всей группы рисков критериев характерно полное отсутствие случаев совпадения выбора оптимальной альтернативы всеми критериями. Этот нетривиальный результат существенно отличается от известных статистических закономерностей взаимной корреляции классических критериев (около 22% случаев совпадения выбора одной альтернативы пятью классическими критериями).

3. Анализ результатов корреляционного анализа показал, что коэффициент взаимной ранговой корреляции критериев максимакса и минимина риска составляет 0,9. Это значение, полученное

на репрезентативной выборке матриц риска можно рассматривать как эмпирическое подтверждение известного теоретического положения «стратегия, оптимальная по максимумному критерию, не обязательно оптимальна по минимальному критерию».

4. Выдвинута и обоснована гипотеза, объясняющая обнаруженные результаты в рамках принятой теории «игры с природой».
5. Проведено ранжирование коэффициентов парной корреляции критерия минимина с другими рисковыми критериями в интересах формирования комбинированной ранговой шкалы (совместно с классическими критериями) с целью увеличения чувствительности оценивания соотношения осторожность/неосторожность для априорного оценивания выбираемой ЛПП стратегии.

Библиографический список

- [1] Клименко И.С. Теория систем и системный анализ. Учебное пособие. / М.: РосНОУ. 2014, 265 с.
- [2] Харкевич А.А. О ценности информации. / В сб.: Проблемы кибернетики, вып.4 – М. Физматгиз, 1960.
- [3] Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Физматгиз, 1959.
- [4] Бриллюэн Л. Наука и теория информации. - М.: Физматгиз, 1960
- [5] Хартли Р. Передача информации / Теория информации и ее приложения. М.: Физматгиз. 1959.
- [6] Лившиц В.Н. Маргинальные рассуждения и инженерно-экономическая практика // Экономика и математические методы. 1999, Т. 35, № 4.
- [7] Клименко И.С., Шарапова Л.В. К исследованию феномена информации // Вестник РосНОУ. 2014, № 4. с.141-149.
- [8] Weaver W. Recent contributions to the mathematical theory of communication // Shannon C. The Mathematical Theory of Communication. – Urbana: University of Illinois Press, 1949. – P. 1–29
- [9] Эрроу К. Дж. Информация и экономическое поведение // Вопросы экономики. 1995. № 5. - С. 98-107.
- [10] иленский, П.Л. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика: Учеб.-практ. пособие / П.Л. Виленский, В.Н. Лившиц, С.А. Смоляк. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Дело, 2008 – 1104с.
- [11] Колмогоров А. Н. Проблемы теории вероятностей и математической статистики // Вестник АН СССР. – 1965. – № 5. – С. 35–36.
- [12] Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. Учебное пособие. / М.: Финансы и статистика. 2005.
- [13] Марамохина, Е. В. Использование принципов теории многокритериального выбора при оценке эффективности экономических систем. // Молодой ученый. — 2014. — № 11 (70). — С. 216-220.
- [14] Росин М.Ф., Булыгин В.С. Статистическая динамика и теория эффективности систем управления. Учебник для вузов / М.: Машиностроение, 1981, 432 с
- [15] Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов в условиях риска и неопределенности (теория ожидаемого эффекта). – М., Наука, 2002
- [16] Щекин Г.В. Теория социального управления / К.: МАУП, 1996, 408с.
- [17] Hurwicz L. Optimality Criteria for Decision Making under Ignorance // Cowles commission papers. 1951. № 370.
- [18] Лабскер Л.Г. Теория критериев оптимальности и экономические решения: монография. / М.: КноРус, 2012. 744с.
- [19] Kannai Y., Peleg B. A note on the extension of an order on set to the power set // J. of Economic Theory, 1984, Vol. 32.
- [20] Хаббард Д. Как измерить все, что угодно. / М.: «Олимп – Бизнес», 2009
- [21] Лабскер Л.Г. Проблема сглаживания критерием Гурвица и её решение // Сб. трудов IV Международной научно практической конференции - биеналле «Системный анализ в экономике», секция 2 «Методы системного моделирования», Москва, 9-10 ноября 2016 г. – М.: ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации». 2016. - Том 1. - С. 195-200.
- [22] Эшби У.Р. Введение в кибернетику. // М.: Иностранная литература, 1959 – 432 с.
- [23] Клименко И.С., Плуталов М.А., Чеботарев Г.А. Сравнительный анализ критериев выбора стратегий в «игре с природой». // Вестник РосНОУ. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2015. - №1 - С. 57 - 61.
- [24] Лабскер Л.Г. Критерий Гурвица: свойство сглаживания, алгоритмы. Экономическое приложение // Микроэкономика. - 2010. - № 5. - С. 181-194.
- [25] Лабскер Л.Г. К вопросу о проблеме сглаживания критерием Гурвица и экономическое приложение // Инновации и инвестиции. - 2016. - № 6. - С. 134-145.
- [26] Лабскер Л.Г. Условия отсутствия у критерия Гурвица свойства сглаживания и экономическое приложение // Экономика и предпринимательство. - 2016. - № 9 (74). - С. 141-149.
- [27] Клименко И.С., Плуталов М.А. О парадоксальном результате применения критерия Гурвица для поиска взвешенных решений в «игре с природой» // Вестник Российского нового университета. Серия: «Сложные системы: модели, анализ, управление». 2016. - Выпуск 3. - С. 24-29.
- [28] Клименко И.С., Плуталов М.А., Чеботарев Г.А. К вопросу об оценивании оптимизма критериев выбора стратегий в «игре с природой». // Вестник РосНОУ. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2015 - №2 - С. 19 - 23.
- [29] Клименко И.С., Плуталов М.А., Чеботарев Г.А.

К формированию ранговой шкалы оптимизма критериев выбора решений «игре с природой». // Вестник РосНОУ. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2016 - №3 - С. 19 - 23.

- [30] И.С. Клименко, М.А. Плуталов, Г.А. Чеботарев. Сравнительный анализ критериев выбора стратегий в «игре с природой». // Вестник РосНОУ. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». - 2015, №1, с. 55-59.
- [31] Savage L.J. The foundation of statistics. / N.Y.: Wiley, 1954.
- [32] Хаббард Д.У. Оценка стоимости информации: сокращение потерь и расширение возможностей. // [Электронный ресурс] URL: http://www.elitarium.ru/2014/03/05/ocenka_stoimosti_informacii.html. (Дата обращения: 05.03.2020)
- [33] Друкер П. Задачи менеджмента в XXI веке: пер. с англ. – М.: Изд. Дом «Вильямс». 2001.
- [34] Клименко И.С., Плуталов М.А. О ранжировании критериев выбора решений, сформированных на матрице риска. // Вестник РосНОУ. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2017 – №2 – с.63-65.
- [35] Wald A. Contribution of the theory of statistical estimation and testing hypothesis //Annuals Math. Statist., 1939, Vol.10, p.299-326.
- [36] Смирнова К.А. Понятие неопределенности экономических систем и подходы к ее оценке. // Вестник МГТУ, 2008 - № 2 – с.241-246