

Системный анализ. Понятие системы. Понятие информации. Задача принятия решений. Методы однокритериальной и многокритериальной оптимизации.

Развитие технологий, включаемых современными исследователями [1, 2] в состав ключевых факторов, позволяющих говорить о наступлении четвёртой промышленной революции или Индустрии 4.0, приносит, в том числе, и новые вызовы для компаний инфокоммуникационной отрасли. Применение bigdata, Internet of Things, SON и M2M фактически уже вышло из стадии пилотных проектов в тиражируемое применение, показывающее стабильные результаты для бизнеса.

Однако операционная поддержка деятельности компаний, организация бизнес-процессов, несмотря на широко используемую автоматизацию за счёт применения информационных систем класса BSS/OSS от отечественных и зарубежных производителей программного обеспечения, нередко сталкивается со значительными сложностями в связи с низким уровнем качества автоматизируемых процессов, эффективность реальных экземпляров которых имеет значительные отклонения от целевой функции добавленной стоимости, на которую ориентируется менеджмент компании.

Почему так происходит? Одна из причин заложена в исторически сложившихся в течение первого десятилетия XXI века принципах развития крупных российских инфокоммуникационных компаний в виде опережающего роста за счёт политики слияний и поглощений вместо естественного расширения, зависящего непосредственно от результатов конкурентной борьбы. Все операторы, входящие в настоящий момент в «большую четверку» - ПАО «МТС», ПАО «Вымпелком» (торговая марка Билайн), ПАО «Мегафон», ПАО «Ростелеком» – являлись в указанный период активными игроками на рынке поглощений, вкладывая значительные средства в покупку региональных компаний сотовой и фиксированной связи. При этом присоединение приобретённых компаний в области процессных информационных систем чаще всего происходило по принципу «зонтичного» объединения, когда унаследованные системы BSS/OSS-контура оставались в эксплуатации, передавая в федеральную систему минимальный набор отчётных данных, необходимых для функционирования всей компании в целом.

Второй причиной непрозрачности операционной деятельности компании-оператора связи является практика распределения ответственности за детализацию бизнес-процессов. В теории, формализация и последующая автоматизация бизнес-процессов основана на постоянном улучшении и оптимизации процессов за счёт применения механизма обратной связи (Рис.1).



Рис.1. Принцип постоянного улучшения бизнес-процессов

Однако на практике, формализация сквозных бизнес-процессов, которые являются ключевыми с точки зрения взаимодействия компании-оператора связи и конечного абонента, как потенциального, так и существующего, во всех компаниях разделяется между крупными структурными направлениями – Поддержка продаж, Обслуживание клиентов, Развитие инфраструктуры, Эксплуатация сети и т.д. В результате подобного разделения, принципы и правила автоматизации отрезков сквозного бизнес-процесса, проходящего в зоне ответственности конкретного направления, могут значительно отличаться от применяемых принципов и правил в других направлениях, обеспечивая сквозное взаимодействие только на уровне использования интеграционной шины. В результате, общая картина деятельности компании может быть определена только на уровне соблюдения заранее заданных KPI (key performance indicator – ключевые показатели эффективности), без возможности простого механизма определения причин отклонения значений от заданных показателей.

И, наконец, третьей причиной существующих сложностей с качеством операционной деятельности компании на уровне сквозных процессов, являются применяемые до сих пор принципы моделирования и автоматизации оптимизации бизнес-процессов в рамках систем, относящихся к BSS/OSS-контур. В основе этих принципов лежит экспертная оценка ключевых сотрудников, участвующих в автоматизируемом процессе, получаемая в ходе проведения различных аудитов и интервью. Т.е. фактически до настоящего момента вся исходная информация добывается на вербальном уровне, риск ошибок «человеческого фактора» очень большой. Что в результате может приводить к негативному исходу, когда обновлённый по результатам такого аудита и оптимизации процесс может начать будет работать хуже, приводя в результате к снижению эффективности и увеличению расходов и издержек относительно даже исходного бизнес-процесса до этапа оптимизации [3].

Таким образом, мы приходим к пониманию того, что без системного подхода к данной задаче невозможно получить качественный результат. Можно с уверенностью констатировать, что многих ошибок в управлении предприятием, в организации сквозных процессов можно избежать, если использовать теорию систем и системный анализ. Знания теории систем и процессов, системного и процессного анализа позволяют правильно понимать системную сущность возникающих разнообразных проблем и с помощью методов и моделей принимать рациональные или оптимальные пути их разрешения.

3. Терминология исследуемой темы

3.1. Понятие системы

Авторы [1] предлагают рассматривать инфокоммуникационную компанию как определённую систему.

Относительно понятия «система» с давних пор и до настоящего времени нет единого и устоявшегося определения со стороны специалистов разных научных, теоретических и прикладных направлений исследований. Однако, несмотря на существующие разногласия в трактовке этого понятия, характеризуя понятие «система» все подчеркивают то обстоятельство, что система представляет собой целостный комплекс взаимосвязанных элементов, имеет определенную структуру и взаимодействует с некоторой средой. В зависимости от решаемых задач и поставленных целей исследований описание системы можно осуществлять на разном уровне абстракции и включать в него необходимое количество элементов, связей и действий, отображающих реальную систему.

Обобщая вышесказанное, можно сформулировать понятие «системы» следующим образом: система – это множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определенную целостность, единство при достижении цели [1].

3.2. Составные части системы

Составные части системы подразделяются на элементы, подсистемы и компоненты. Элемент – это простейшая неделимая часть системы или предел ее членения с позиции решения конкретной задачи и поставленной цели. Иначе, элемент – это объект, у которого его внутреннее содержание не раскрывается в силу ограничений, наложенных целью исследований, но, если появится необходимость и возможность его вскрытия и внутреннего

анализа, то он может быть представлен в виде системы сколь угодно сложности.

Таким образом, только в зависимости от взгляда специалиста на систему, от формулировки цели ее исследования и выделенного аспекта изучения можно однозначно решать вопросы разделения системы на элементы.

Следует отметить, что процедура членения системы и выделения из нее элементов в процессе исследования может повторяться и приводить к уточнению множества выделенных элементов. При этом, по необходимости, может изменяться принцип расчленения, что может привести к выделению новых элементов и получению с помощью нового расчленения более адекватного представления об анализируемом объекте или проблемной ситуации. В дальнейшем мы увидим, что подобный подход – декомпозиции системы – активно применяется в самых современных практиках системного анализа процессов оператора связи.

3.3. Система и внешняя среда

Под внешней средой понимается множество элементов, которые не входят в систему, но изменение их состояния может вызывать изменение поведения системы. Следует отметить, что внешняя среда бывает естественно-природной и искусственной, созданной человеком, в том числе технической, энергетической, экономической, информационной, социальной и других видов. В некоторых случаях на начальных этапах исследования определение системы базируется на отделении ее от внешней среды так как очень важно определить границы системы, которая функционирует в некоторой окружающей ее среде.

Сложное взаимодействие системы с ее окружением характеризуется тем, что система образует со средой особое единство. При этом, как правило, любая исследуемая система представляет собой элемент системы более высокого порядка (надсистемы), а элементы любой исследуемой системы, в свою очередь, обычно выступают как системы более низкого порядка. Выделяют четыре ситуативных класса такого взаимодействия: содействующее, противодействующее, нейтральное и смешанное:

- Содействующей выступает среда в том случае, если она оказывает положительное влияние на функционирование и развитие системы, способствует достижению ее целей и повышению эффективности ее деятельности.
- Противодействующая среда, наоборот, подавляет функционирование и снижает эффективность системы, препятствуя достижению целей.
- При нейтральном взаимодействии среда не оказывает непосредственного воздействия на систему. Но даже в этом случае

необходимо учитывать ее присутствие, так как нейтральность есть неустойчивое состояние, в котором формируются условия, определяющие переходы к содействию или противодействию.

- Для смешанной среды характерны все перечисленные варианты ее влияния на систему.

Учет влияния среды на функционирование изучаемой системы является необходимым условием любого системного исследования. В этой связи важно прогнозировать состояние и поведение не только системы, но и среды с учетом ее свойств, в том числе возможной ее неоднородности.

3.4. Связи и отношения в системе

Связи, отношения и взаимодействия в системе обеспечивают ее определенную внутреннюю структурную целостность, поддерживают самостоятельное функционирование системы, выделяющейся на фоне внешней среды. Эти понятия одновременно характеризует строение (статику) и функционирование (динамику) системы.

Связь – общенаучное понятие, трактуемое в теории систем и системном анализе как коммуникационный канал или способ, с помощью которого реализуются взаимодействия между объектами (элементами, компонентами, подсистемами и системами). С информационно-технической точки зрения связь – это каналы и процессы передачи и приема информации с помощью различных технических средств.

Отношение – общенаучное понятие, используемое для соотнесения одного объекта с другим и определяющее расположение одного объекта (элемента, компонента, подсистемы и системы) относительно другого в пространстве или во времени. Именно это характеризует отношение в большей степени, чем наличие между объектами каких-либо связей. Так, в частности, отношения выражают следующие связки: «часть – целое», «начальник – подчиненный», «управляющий – управляемый», «высший – низший», «координатор – регулятор» и т.д.

С одной стороны, отношения инициируют образование связей и взаимодействий, а с другой – сами являются результатом возникновения (разрушения) связей в процессе развития взаимодействий. Поэтому говорят, что отношения и связи – это ненасыщенные физическим содержанием взаимодействия.

Взаимодействие (взаимное воздействие) – процесс перемещения вещества, энергии и информации между объектами (элементами, компонентами, подсистемами и системами), имеющий результат. При этом следует отметить, что современное естествознание выделяет шесть видов взаимодействий: механическое, гравитационное, электромагнитное, внутриядерное, торсионное и информационное.

В системах с вещественной структурой взаимодействия между элементами (компонентами) реализуются, главным образом, путем

взаимообмена различного рода предметами, вещами, продуктами производства.

Системы с энергетической структурой содержат межэлементные (межкомпонентные) взаимодействия, которые выражаются преимущественно в виде обмена энергией.

Для систем с информационной структурой характерны межэлементные (межкомпонентные) взаимодействия преимущественно информационного свойства. Примерами таких систем служат компьютерные и радиотелекоммуникационные сети. Поскольку реальным системам в той или иной мере свойственны все перечисленные типы структур, то говорят о смешанных структурах, в которых межэлементные (межкомпонентные) взаимодействия реализуются за счет вещественного, энергетического и информационного обмена. Такой обмен между элементами (компонентами) системы, а также между системой и средой называется метаболизмом. Выделяют семь форм метаболизма:

- вещественную;
- энергетическую;
- информационную;
- вещественно-энергетическую;
- вещественно-информационную;
- информационно-энергетическую;
- вещественно-информационно-энергетическую.

Кроме того, различают внутренний и внешний метаболизм. Внутренний метаболизм происходит между элементами (компонентами) системы, а внешний – между системой (ее элементами, компонентами, подсистемами) и средой. Внутренний метаболизм играет важную роль при формировании целостных свойств систем, а внешний – определяет степень открытости системы.

По направленности процессов в системе в целом или в отдельных ее подсистемах связи бывают прямыми и обратными. Важнейшую роль в организации систем играет понятие обратной связи, обеспечивающей воздействие результатов функционирования какой-либо системы (объекта) на характер этого функционирования. Обратная связь бывает положительной или отрицательной. Положительная связь обеспечивает влияние, усиливающее результаты функционирования и сохраняет тенденции происходящих в системе изменений того или иного выходного параметра (используется в генераторах, в развивающихся системах и т. п.). Отрицательная связь обеспечивает влияние, уменьшающее или ослабляющее результаты функционирования и противодействует тенденциям изменения выходного параметра, т. е. направлена на сохранение, стабилизацию требуемого значения параметра (например, в системах организационного управления для стабилизации количества выпускаемой продукции и т. п.).

Обратная связь является основой саморегулирования, развития систем, приспособления их к изменяющимся условиям существования.

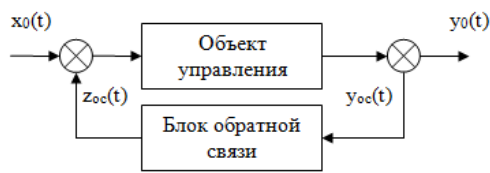


Рис. 2. Блок-схема обратной связи

3.5. Структура и иерархия системы

Структура – это совокупность отдельных частей системы и связей между ними. Она отражает наиболее существенные и устойчивые взаимоотношения между элементами и их группами (компонентами, подсистемами), которые мало меняются при изменениях в системе и обеспечивают существование системы и ее основных свойств, а также сохранение ее целостности в условиях внешних и внутренних возмущений.

Таким образом, структура характеризует организованность системы, устойчивую упорядоченность элементов и связей. При этом системы могут иметь различную физическую природу.

Одна и та же система может быть представлена разными структурами, в зависимости от стадии познания объектов или процессов, от аспекта их рассмотрения, цели создания. При этом, по мере развития исследований или в ходе проектирования, структура системы может изменяться.

Если структурные элементы и их связи не могут быть установлены или на этапе анализа они абстрагируются от детализации структуры, то в этом случае систему представляют в виде «черного ящика», т. е. в виде модели некоторого обобщенного блока, имеющего только входные и выходные параметры (модель «вход – выход»), как это показано ниже:



Рис. 3. Представление системы в виде «черного ящика»

Структуры можно классифицировать по ряду признаков:



Рис. 4 Классификация структур

Матричные организационные структуры примерно с середины 80-х гг. прошлого века составляют основу организации управления почти всех ведущих фирм мира. Принцип построения такой структуры показан на рис. 1.3, где кружками обозначены исполнители, а прямоугольниками управляющие органы отдельных подразделений.

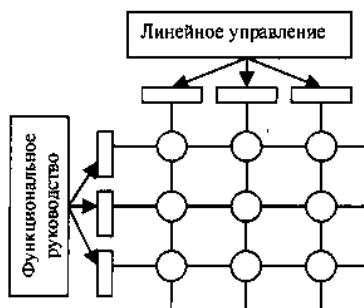


Рис. 5. Представление матричных структур

В теории систем рядом исследователей (в частности М. Месаровичем) предложены особые классы иерархических структур типа страт, слоев, эшелонов, которые отличаются различными принципами взаимоотношений элементов в пределах уровня и различным правом вмешательства вышестоящего уровня в организацию взаимоотношений между элементами нижележащего. С помощью этих понятий исследуются проблемы управления предприятиями в современных условиях многоукладной экономики, осуществляется проектирование сложных систем.

Страты – это уровни описания сложных систем, при которых фиксируется определенная общность законов функционирования, единство пространственно-временной топологии и субстанционального построения определенных компонентов изучаемой системы. При этом с определенных позиций выбирается соответствующий уровень абстрагирования, для которого существуют характерные особенности, законы и принципы

описания состояния и поведения системы на этом уровне. Такое представление называется стратифицированным, а уровни абстрагирования – стратами.

Стратифицированное представление можно использовать и как средство последовательного углубления представления о системе, ее детализации: чем ниже опускаемся по иерархии страт, тем более детальным становится раскрытие системы; чем выше поднимаемся, тем яснее становится смысл и значение всей системы. При этом объяснить назначение системы с помощью элементов нижней страты в сложных системах практически невозможно.

Слои – вид многоуровневой структуризации применяется для организации процессов принятия решений, причем в данном случае каждый уровень или слой представляет собой точку зрения исследователя (по выражению У.Р. Эшби – наблюдателя) на различные аспекты изучаемой системы. Зачастую слоями называют структурные компоненты системы, выделенные по временному признаку или по типу решаемых задач. Такими слоями могут быть прогнозирование, текущее планирование, оперативное управление и регулирование.

Многослойные системы принятия решений полезно формировать для решения задач планирования и управления промышленными предприятиями, отраслями, народным хозяйством в целом. При постановке и решении таких проблем нельзя раз и навсегда определить цели, выбрать конкретные действия: экономические и технологические условия производства непрерывно меняются. Все это можно отразить в многослойной модели принятия решений.

Эшелоны – это описание иерархической структуры, при котором система представляется в виде относительно независимых, взаимодействующих между собой подсистем. При этом некоторые (или все) подсистемы имеют права принятия решений, а иерархическое расположение подсистем (многоэшелонная структура) определяется тем, что некоторые из них находятся под влиянием или управляются вышестоящими подсистемами. Уровни структуры системы при таком представлении называют эшелонами.

Отношения, подобные принятым в эшелонированных структурах, реализуются в практике управления в форме так называемых холдинговых структур, или холдингов. Правила взаимоотношений между фирмами, банками, торговыми домами и другими организациями, входящими в холдинг, оговариваются в соответствующих договорах и других нормативно-правовых и нормативно-технических документах.

В реальных системах организационного управления могут быть использованы одновременно несколько видов иерархических структур: от древовидных до многоэшелонных. Такие иерархические структуры называются смешанными. При этом основой объединения структур могут служить страты и, поэтому, в принципе, можно считать их развитием стратифицированного представления. В таких смешанных иерархических

структурах могут быть как вертикальные связи разной силы (управление, координация), так и горизонтальные взаимодействия между элементами (подсистемами) одного уровня.

3.6. Состояние и поведение системы

Под понятием «состояние системы» понимают ее описание в некоторый момент времени, характеризующее что-то вроде мгновенной «фотографии» или «среза» системы. При этом система рассматривается в остановке своего развития. Состояние системы определяют, как правило, через ее параметры (макропараметры), характеризующие свойства системы (например, давление, скорость, ускорение – для физических систем; производительность, себестоимость продукции, прибыль – для экономических систем). Таким образом, состояние системы можно определить как множество существенных свойств, которыми система обладает в данный момент времени, а поведение – это свойство системы переходить из одного состояния в другое.

С понятиями «состояние» и «поведение» тесно связаны понятия «равновесие» и «устойчивость». Равновесие – это способность системы при отсутствии внешних возмущающих воздействий (или при постоянных воздействиях) сохранить свое состояние сколь угодно долго. Такое состояние называют состоянием равновесия. Устойчивость характеризует способность системы возвращаться в состояние равновесия после того, как она была из этого состояния выведена под влиянием внешних возмущающих воздействий, а в системах с активными элементами – под влиянием возможных внутренних возмущающих воздействий. Эта способность обычно присуща системам при постоянном входном воздействии, если только отклонения не превышают некоторого предела (порогового значения).

Такое состояние, в которое система способна возвращаться, называют устойчивым состоянием равновесия. Возврат в это состояние может сопровождаться колебательным процессом. Соответственно, в сложных системах возможны неустойчивые состояния равновесия. Система, у которой существует одна единственная область устойчивости, называется системой с сильной или глобальной устойчивостью. Система, обладающая множеством устойчивых областей, в каждую из которых она способна переходить в результате отклоняющих воздействий, называется системой со слабой или локальной устойчивостью.

3.7. Понятие цели в исследовании систем

Процессы целеполагания и целеобразования являются основными при исследовании систем. От них зависит постановка задач исследований,

выделение системы из среды, определение ее характеристик и закономерностей, а в результате – адекватность описания реальных явлений. Анализ определений цели и связанных с ней понятий показывает, что, в зависимости от стадии познания объекта и от этапа системного анализа, в понятие «цель» вкладывают различные оттенки в пределах условной шкалы: от идеальных устремлений до конкретных целей, т. е. конечных результатов. В теории систем и системном анализе большое внимание уделяется концептуальным подходам к формулированию и структуризации целей в конкретных условиях, а также выяснению единства и взаимосвязей между понятиями цели, средства (варианта) ее достижения и критерия оценки, а на этой основе – исследованию целостности системы.

В большинстве случаев (а в экономических системах – повсеместно), показателем полноты достижения цели «жизни» системы служит стоимостной показатель. Разумеется, что выбор показателя – критерия эффективности системы – является заключительным этапом формулировки целей и задач системы. Но нельзя упускать из виду того, что от этого этапа будут зависеть наши представления о свойствах системы и результаты самого системного анализа.

При этом формулировка цели и представление о ней зависит от стадии познания объекта, и в процессе развития представления об объекте цель может переформулироваться. Также необходимо помнить о том, что цели могут возникать на основе противоречий как между внешними и внутренними факторами, так и между внутренними факторами, имевшимися ранее и вновь возникающими в находящейся в постоянном самодвижении целостности. Это – очень важное отличие организационных «развивающихся», открытых систем от технических (замкнутых, закрытых) систем.

На любом уровне цель возникает вначале в виде «образа» цели. При этом достичь одинакового понимания общей цели всеми исполнителями, по-видимому, принципиально невозможно без её детализации в виде упорядоченного или неупорядоченного набора взаимосвязанных подцелей, которые делают её понятной и более конкретной для разных исполнителей. Поэтому задача формулирования общей цели в сложных системах должна быть сведена к задаче структуризации цели.

Наиболее распространенным способом представления структур целей является древовидная иерархическая структура. Существуют и другие способы отображения: иерархия со «слабыми» связями, табличное или матричное представление, сетевая модель. Иерархическое и матричное описание – это декомпозиция во времени. Промежуточные подцели могут формулироваться по мере достижения предыдущей, что может использоваться как средство управления. Перспективным представляется развертывание иерархических структур во времени, т.е. сочетание декомпозиции цели в пространстве и во времени. В иерархической структуре целей, как и в любой иерархической структуре, закономерность

целостности проявляется на каждом уровне иерархии. Применительно к структуре целей это означает, что достижение целей вышележащего уровня не может быть полностью обеспечено достижением подцелей, хотя и зависит от них, и что потребности, мотивы, программы, влияющие на формирование целей, нужно исследовать на каждом уровне иерархии.

3.8. Закономерности функционирования и развития систем

Закономерности функционирования и развития систем характеризуют принципиальные особенности построения, функционирования и развития сложных систем. Многие исследователи по-разному трактуют понятие закономерности систем, называя их системными параметрами или макроскопическими свойствами, или признаками системы и т. п. Разнообразные закономерности систем условно можно подразделить на четыре следующие группы, как показано на рис. 6:

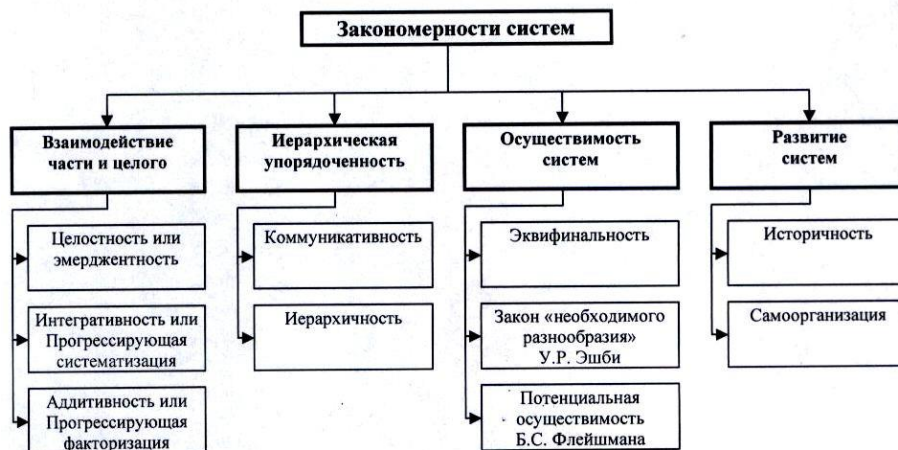


Рис. 6. Группировка закономерностей систем по различным признакам

Закономерность целостности проявляется в системе в возникновении новых интегративных качеств, не свойственных образующим её компонентам. Для того, чтобы глубже понять закономерность целостности, необходимо рассмотреть две её стороны: 1) Свойства системы (целого) не являются суммой свойств элементов или частей (несводимость целого к простой сумме частей); 2) свойства системы (целого) зависят от свойств элементов, частей (изменение в одной части вызывает изменение во всех остальных частях и во всей системе). Существенным проявлением закономерности целостности являются новые взаимоотношения системы как целого со средой, отличные от взаимодействия с ней отдельных элементов. Свойство целостности связано с целью, для выполнения которой предназначена система.

Весьма актуальным является оценка степени целостности системы при переходе из одного состояния в другое. В связи с этим возникает двойственное отношение к закономерности целостности. Её называют

физической аддитивностью, независимостью, суммативностью, обособленностью. Свойство физической аддитивности проявляется у системы, как бы распавшейся на независимые элементы. Строго говоря, любая система находится всегда между крайними точками условной шкалы: абсолютная целостность- абсолютная аддитивность, и рассматриваемый этап развития системы можно охарактеризовать степенью проявления в ней одного или другого свойства и тенденций к его нарастанию или уменьшению.

Для оценки этих явлений А.Холл ввёл такие закономерности, как прогрессирующая факторизация (стремление системы к уменьшению самостоятельности элементов, т.е. к большей целостности). Имеются методы введения сравнительных количественных оценок степени целостности, коэффициента использования элементов в целом с точки зрения определённой цели.

Термин «интегративность» часто употребляют как синоним целостности. Однако им подчеркивают интерес не к внешним факторам проявления целостности, а к более глубоким причинам формирования этого свойства и, главное, - к его сохранению. Интегративными называют системообразующие, системосохраняющие факторы, важными среди которых являются неоднородность и противоречивость её элементов.

Коммуникативность говорит о том, что система образует особое единство со средой; как правило, любая исследуемая система представляет собой элемент системы более высокого порядка; элементы любой исследуемой системы в свою очередь обычно выступают как системы более низкого порядка. Иными словами, система не изолирована, она связана множеством коммуникаций со средой, которая не однородна, а представляет собой сложное образование, содержит надсистему (или даже надсистемы), задающую требования и ограничения исследуемой системе одного уровня с рассматриваемой.

Иерархичность как закономерность заключается в том, что закономерность целостности проявляется на каждом уровне иерархии. Благодаря этому на каждом уровне возникают новые свойства, которые не могут быть выведены как сумма свойств элементов. При этом важно, что не только объединение элементов в каждом узле приводит к появлению новых свойств элементов, но и что каждый член иерархии приобретает новые свойства, отсутствующие у него в изолированном состоянии.

Таким образом, на каждом уровне иерархии происходят сложные качественные изменения, которые не всегда могут быть представлены и объяснены. Но именно благодаря этой особенности рассматриваемая закономерность приводит к интересным следствиям. Во-первых, с помощью иерархических представлений можно отображать системы с неопределённостью. Во-вторых, построение иерархической структуры зависит от цели: для многоцелевых ситуаций можно построить несколько иерархических структур, соответствующих разным условиям, и при этом в разных структурах могут принимать участие одни и те же компоненты. В-

третьих, даже при одной и той же цели, если поручить формирование иерархической структуры, разным исследователям, то в зависимости от их предшествующего опыта, квалификации и знания системы они могут получить разные иерархические структуры, т.е. по-разному разрешить качественные изменения на каждом уровне иерархии.

Время является неперменной характеристикой системы, поэтому каждая система исторична, и это такая же закономерность как целостность, интегративность и др. Если можно легко привести примеры становления, расцвета, упадка и даже смерти биологических и общественных систем, то для технических и организационных систем определить периоды развития довольно трудно.

Основа закономерности историчности – внутренние противоречия между компонентами системы. Но вот как управлять развитием или хотя бы понимать приближение соответствующего периода развития системы – эти вопросы ещё мало исследованы.

В последнее время на необходимость учета закономерности историчности начинают обращать всё больше внимания. В частности, в системотехнике при создании сложных технических комплексов требуют, чтобы уже на стадии проектирования системы рассматривались не только вопросы создания и обеспечения развития системы, но и вопрос, как и когда нужно её уничтожить.

Закономерность необходимого разнообразия говорит нам о том, что создания системы, способной справиться с решением проблемы, обладающей определённым, известным разнообразием нужно, чтобы система имела ещё большее разнообразие, чем разнообразие решаемой проблемы, или была способна создать в себе это разнообразие. Это достаточно широко применяется на практике и позволяет, например, получить рекомендации по совершенствованию системы управления предприятием, объединением, отраслью.

Исследования взаимосвязи сложности структуры системы со сложностью поведения позволили получить количественные выражения предельных законов для таких качеств системы, как надёжность, помехоустойчивость, управляемость и др. На основе этих законов оказалось возможным получение количественных оценок порогов осуществимости систем с точки зрения того или иного качества, а объединяя качества – предельные оценки жизнеспособности и потенциальной эффективности сложных систем.

3.9. Классификация систем

Системы разделяются на классы по различным признакам, и в зависимости от решаемой задачи можно выбрать разные принципы классификации. При этом система может быть охарактеризована одним или несколькими признаками.

Системы классифицируются следующим образом:

- По виду отображаемого объекта – технические, биологические и др.;
- По виду научного направления – математические, физические, химические и т. п.;
- По виду формализованного аппарата представления системы – детерминированные и стохастические;
- По типу целеустремленности – открытые и закрытые;
- По сложности структуры и поведения – простые и сложные;
- По степени организованности – хорошо организованные, плохо организованные (диффузные), самоорганизующиеся системы.

Рассмотрим более подробно два последних вида классификации систем.

1. Хорошо организованные системы. Представить анализируемый объект или процесс в виде хорошо организованной системы означает определить элементы системы, их взаимосвязь, правила объединения в более крупные компоненты, т.е. определить связи между всеми компонентами и целями системы, с точки зрения которых рассматривается объект или ради достижения которых создается система. Проблемная ситуация может быть описана в виде математического выражения, связывающего цель со средствами, т.е. в виде критерия эффективности, критерия функционирования системы, который может быть представлен сложным управлением или системой уравнений. Решение задачи при представлении её в виде хорошо организованной системы осуществляется аналитическими методами формализованного представления системы.

Примеры хорошо организованных систем: солнечная система, описывающая наиболее существенные закономерности движения планет вокруг Солнца, отображение атома в виде планетарной системы, состоящей из ядра и электронов; описание работы сложного электронного устройства с помощью системы уравнений, учитывающей особенности условий его работы (наличие шумов, нестабильности источников питания и т.п.).

Для отображения объекта в виде хорошо организованной системы необходимо выделять существенные и не учитывать относительно несущественные для данной цели рассмотрения компоненты: например, при рассмотрении солнечной системы не учитывать метеориты, астероиды и другие мелкие по сравнению с планетами элементы межпланетного пространства.

Представление объекта в виде хорошо организованной системы применяется в тех случаях, когда можно предложить детерминированное описание и экспериментально доказать правомерность его применения, адекватность модели реальному процессу. Попытки применить класс хорошо организованных систем для представления сложных

многокомпонентных объектов или многокритермальных задач плохо удаётся: они требуют недопустимо больших затрат времени, практически не реализуемы и неадекватны применяемым моделям.

2. При представлении объекта в виде плохо организованной или диффузной системы не ставится задача определить все учитываемые компоненты, их свойства и связи между ними и целями системы. Система характеризуется некоторым набором макропараметров и закономерностями, которые находятся на основе исследования не всего объекта или класса явлений, а на основе определенной с помощью некоторых правил выборки компонентов, характеризующих исследуемый объект или процесс. На основе такого выборочного исследования получают характеристики или закономерности (статические, экономические) и распространяют их на всю систему в целом. При этом делаются соответствующие оговорки. Например, при получении статистических закономерностей их распространяют на поведение всей системы с какой-то доверительной вероятностью.

Подход к отображению объектов в виде диффузных систем находит широкое применение при описании систем массового обслуживания, при определении численности штатов на предприятиях и учреждениях, при исследовании документальных потоков информации в системах управления и т.д.

3. Отображение объекта в виде самоорганизующейся системы – это подход, который позволяет исследовать наименее изученные объекты и процессы. Самоорганизующиеся системы обладают признаками диффузных систем: стохастичность поведения, нестационарностью отдельных параметров и процессов. К этому добавляются такие признаки, как непредсказуемость поведения, способность адаптироваться к изменяющимся условиям среды, изменять структуру при взаимодействии системы со средой, сохраняя при этом свойства целостности, способность формировать возможные варианты поведения и выбирать из них наилучший и др. Иногда этот класс разбивают на подклассы, выделяя адаптивные или самоприспосабливающиеся системы, самовосстанавливающиеся, самовоспроизводящие и другие классы, соответствующие различным свойствам развивающихся систем.

Примеры: биологические организации, коллективное поведение людей, организация управления на уровне предприятия, отрасли, государства в целом, т.е. в тех системах, где обязательно имеется человеческий фактор.

При применении отображения объекта в виде самоорганизующейся системы задачи определения целей и выбора средств, как правило, разделяются. При этом задача выбора целей может быть в свою очередь описана в виде самоорганизующейся системы, т.е. структура функциональной части АСУ, структура целей, плана может развиваться также как структура обеспечивающей части АСУ (комплекс технических средств АСУ) или организационная структура системы управления.

Большинство примеров применения системного анализа бизнес-процессов компании основано на представлении объектов в виде самоорганизующихся систем.

Задачи однокритериальной оптимизации

Существует значительное число экономических систем, в частности из области управленческой деятельности, моделируя которые мы приходим к различным формам задач оптимизации. Рассмотрим задачу однокритериальной оптимизации. В общей форме она запишется следующим образом:

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \max(\min), \mathbf{x} \in \mathbf{X}.$$

Т.е. на некотором допустимом множестве \mathbf{X} максимизируется либо минимизируется функция от вектора переменных $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$.

Действительно, практически любая задача управления состоит в оптимизации заданной целевой функции при некоторых “бюджетных ограничениях”. Мы либо максимизируем прибыль (объем производства, функцию полезности, заданную в произвольной форме, или любой прочий эквивалент “счастья”), либо минимизируем затраты (риск при инвестировании, объем перевозок и т.д.). При этом в различных задачах нас ограничивают объем имеющихся денежных средств, объем ресурсов (сырьевых либо каких-то иных) и любые другие соображения. Подобные ограничения обычно записываются в виде равенств и неравенств. Таким образом, получаем следующую формулировку задачи оптимизации

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &\rightarrow \max, \\ g_i(\mathbf{x}) &= 0, \quad i = 1, \dots, m, \\ h_j(\mathbf{x}) &\leq 0, \quad j = 1, \dots, k. \end{aligned}$$

Очевидно, что задача минимизации может быть превращена в задачу максимизации путем замены функции $f(\mathbf{x})$ на $-f(\mathbf{x})$.

В частном случае, когда все функции $f(\mathbf{x})$, $g_i(\mathbf{x})$ и $h_j(\mathbf{x})$ являются линейными, задача называется задачей линейного программирования.

2. Примеры задач однокритериальной оптимизации

Рассмотрим несколько примеров задач однокритериальной оптимизации.

2.1. Производственная задача.

Пусть некоторое предприятие способно выпускать n видов продукции (A_1, A_2, \dots, A_n) . При этом используется m видов ресурсов

(B_1, B_2, \dots, B_m) , $m < n$. Под ресурсами подразумеваются денежные средства,

виды сырья, рабочая сила, производственные мощности, площади, технологии. Прибыль от реализации единицы продукции A_j составляет c_j .

Затраты i -ресурса на производство одной единицы j -вида продукции составляет a_{ij} (сколько требуется денег, сырья, человеко-часов рабочей си-

лы, часов работы оборудования и т.д., чтобы произвести единицу продукции). Имеющийся объем i -ресурса равен b_i . Нужно составить такой план производства, при котором мы получим максимальную прибыль.

Пусть производится x_j единиц продукции A_j . Прибыль при этом будет равна

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max. \quad (1)$$

Суммарные затраты по i -виду ресурса составят

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j.$$

Зная, каков

имеющийся объем ресурса, составим ограничения

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m. \quad (2)$$

И последним видом ограничений будут очевидная неотрицательность объемов производимой продукции

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Мы получили задачу линейного программирования (1)-(3). Наиболее распространенным методом ее решения является симплекс-метод, хотя существует и значительное число других подходов.

2.2. Транспортная задача.

Пусть у нас имеется m пунктов производства однородного продукта:

(A_1, A_2, \dots, A_m) и n пунктов его потребления (B_1, B_2, \dots, B_n) . В каждом из пунктов A_i производится a_i единиц продукта, а в каждом из пунктов B_j потребляется соответственно b_j единиц. Необходимо составить оптимальный план перевозок (при котором достигается их минимальная суммарная стоимость), если известно, что удельная стоимость перевозки из пункта A_i в пункт B_j составляет c_{ij} .

Составим математическую модель. Пусть x_{ij} - объем продукта, перевозимого из A_i в B_j . Тогда общая стоимость перевозок, которую мы минимизируем, будет равна

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Суммарный объем груза, вывозимого из пункта A_i , составит $\sum_{j=1}^n x_{ij}$, а он по

условию равен a_i . Суммарный объем груза, привозимого в B_j , равный по

условию b_j , составит $\sum_{i=1}^m x_{ij}$. Получим ограничения

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, \dots, m, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, j = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Также здесь присутствуют ограничения неотрицательности всех объемов перевозок

$$x_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Задача (4)-(7) называется транспортной. Начальный допустимый план можно получить методом северо-западного угла. Затем проводится последовательное улучшение плана методом потенциалов.

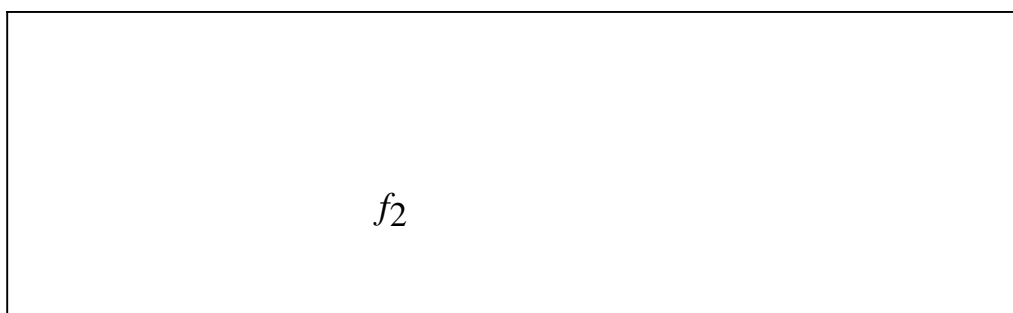
Задачи многокритериальной оптимизации

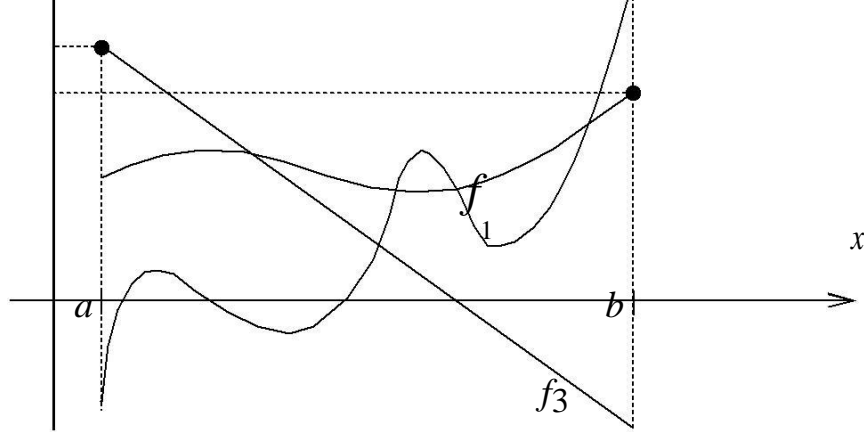
Пусть у нас имеется несколько целевых функций, которые для упрощения записи нам нужно максимизировать (как уже говорилось, задача на минимум преобразуется заменой знака функции на противоположный). В рассмотренной модели ими являются доходность и “минус-дисперсия”, в других задачах, разумеется, могут возникать любые другие варианты целевых функций. По-прежнему имеется набор ограничений, задающих область допустимых значений задачи. Получаем задачу многокритериальной оптимизации, которая в общей форме формулируется следующим образом:

$$f_i(\mathbf{x}) \rightarrow \max, i = 1, \dots, m, \quad (12)$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X}.$$

Главная возникающая здесь сложность в неоднозначности оптимального решения: в точке, где один из критериев достигает своего максимума, другой может быть очень далек не только от максимума, но и даже от какой-либо приемлемой величины. Продемонстрируем возможную ситуацию на рисунке





Видим, что максимум функций f_1 и f_2 достигается в точке b , однако она же является точкой минимума третьей функции f_3 , максимум которой достигается в точке a . Каким образом можно прийти к компромиссу? Существует множество подобных способов. Рассмотрим их поочередно.

Сведение многокритериальной задачи однокритериальной

Способ 1. Выделение главного критерия (условная максимизация).

Применение данного подхода на модели оптимизации портфеля ценных бумаг привело к рассмотренной выше задаче однокритериальной оптимизации (8)-(11). Его суть достаточно проста: выбирается наиболее важный из всего набора критериев и проводится его оптимизация при условии того, что значения остальных критериев не хуже наперед заданных фиксированных значений, считающихся удовлетворительными.

В рассмотренной модели была выбрана предельная величина риска портфеля, превосходить которую мы не можем, какова бы при этом ни была доходность портфеля.

Формализуем этот подход для задачи (12). Пусть выбран наиболее важный для нас критерий f_1 (перенумеруем критерии так, чтобы самый

важный оказался первым). Пусть заданы числа f_i^{\min} , $i = 2, \dots, m$ - удовлетворяющие нас значения соответствующих критериев. Будем решать следующую однокритериальную задачу:

$$f_1(\mathbf{x}) \rightarrow \max,$$

$$f_i(\mathbf{x}) \geq f_i^{\min}, i = 2, \dots, m,$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X}.$$

Главное в этом подходе избежать двух крайних случаев: когда множество точек \mathbf{x} , при которых выполняются все неравенства $f_i(\mathbf{x}) \geq f_i^{\min}$, совпадает с самим множеством \mathbf{X} (тогда непонятно, для чего нужны остальные критерии) и когда подобное пересечение с множеством \mathbf{X} пусто (относясь слишком привередливо к побочным критериям, мы задали такие значения f_i^{\min} , при которых не осталось ни одной допустимой точки).

Способ 2. Линейная свертка.

Наиболее простым и часто используемым способом сведения многокритериальной задачи к однокритериальной является линейная свертка. Задаются весовые неотрицательные коэффициенты c_i , обозначающие степень важности каждого критерия, и максимизируется линейная комбинация целевых функций, т.е. решается задача

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m c_i f_i(\mathbf{x}),$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X}, \tag{13}$$

$$c_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m, \quad \sum_{i=1}^m c_i = 1.$$

В крайнем случае, когда какой-то из коэффициентов $c_j = 1$, а все остальные $c_i = 0, i \neq j$, мы приходим к однокритериальной задаче максимизации j -целевой функции.

Способ 3. Максиминная свертка.

В этом способе заранее задаются масштабирующие коэффициенты f_i^0 (в частном случае все значения можно принять равными $f_i^0 = 1$) и решается задача максиминной оптимизации

$$g(\mathbf{x}) = \min_{i=1, \dots, n} \frac{f_i(\mathbf{x})}{f_i^0} \rightarrow \max,$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X}.$$

Коэффициенты f_i^0 здесь используются для приведения всех целевых функций к примерно одному масштабу, либо наоборот, для выделения какого-либо из критериев. Основным недостатком данного подхода является возможная потеря гладкости полученной целевой функции, однако в некоторых случаях применение такого способа свертки является достаточно удобным.

Способ 4.

Приведем еще один способ, который выдает достаточно точное с точки зрения экономической интерпретации решение. Поскольку мы предполагаем, что умеем легко решать задачи однокритериальной оптимизации, то вычислим сначала максимальные и минимальные значения, которые может принимать на допустимом множестве каждая из целевых функций:

$$f_i^{\max} = \max_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} f_i(\mathbf{x}), \quad i = 1, \dots, m,$$

$$f_i^{\min} = \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} f_i(\mathbf{x}), \quad i = 1, \dots, m.$$

В этом случае разность этих значений

$$f_i^{\max} - f_i^{\min}$$

будет интерпретироваться как амплитуда, разность значений

$$f_i^{\max} - f_i(\mathbf{x})$$

- как абсолютное отклонение от максимума i - целевой функции в точке \mathbf{x} ,

а их частное

$$\frac{f_i^{\max} - f_i(\mathbf{x})}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}$$

$$f_i^{\max} - f_i^{\min}$$

- как относительное отклонение от максимума i - целевой функции (в точке максимума оно равно нулю, а в точке минимума - единице).

Способ свертки состоит в решении задачи минимизации линейной комбинации с неотрицательными весовыми коэффициентами c_i , обозначающими важность i -критерия, относительных отклонений, определенных выше:

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m c_i \frac{f_i^{\max} - f_i(\mathbf{x})}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \rightarrow \min,$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X},$$

$$c_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m, \quad \sum_{i=1}^m c_i = 1.$$

Существенным недостатком данного подхода является большой объем вычислений, необходимых для получения решения.

Способ 5. Метод идеальной точки.

Последний подход к получению однозначного решения задачи многокритериальной оптимизации несколько отличается от предложенных выше.

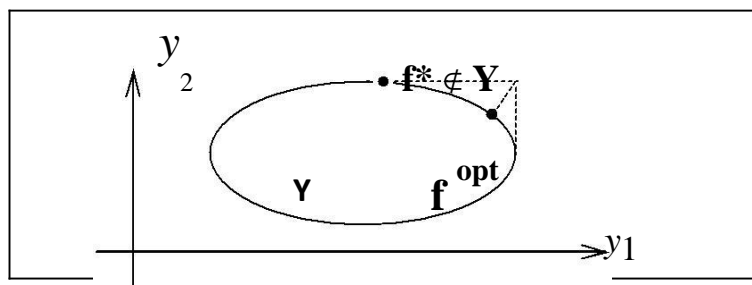
Определим множество достижимости многокритериальной задачи как множество всех возможных значений целевых функций, которые мы получаем при всех допустимых значениях \mathbf{x} :

$$\mathbf{Y} = \left\{ \mathbf{y} \in \mathbf{R}^m : \mathbf{y} = f(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \mathbf{X} \right\}$$

Идеальной точкой назовем вектор, состоящий из максимальных значений всех целевых функций:

$$\mathbf{f}^* = \left(\max_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} f_1(\mathbf{x}), \max_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} f_2(\mathbf{x}), \dots, \max_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} f_m(\mathbf{x}) \right)$$

Продемонстрируем это на рисунке:



Основным исследуемым случаем здесь, конечно, является вариант, когда $f^* \notin Y$. В противном случае имеется точка, в которой достигается максимум по всем критериям, она и является оптимальной.

Решением задачи многокритериальной оптимизации будем считать точку, вектор значений целевых функций в которой минимально по норме отличается от идеальной точки:

$$|f(x) - f^*| \rightarrow \min, x \in X.$$

Подобное решение f^{opt} изображено на рисунке.

Можно использовать как стандартную евклидову норму

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m (f_i(x) - f_i^*)^2} \rightarrow \min, x \in X,$$

так и Чебышевскую норму (максимальное по модулю отклонение)

$$\max_{i=1, \dots, m} |f_i(x) - f_i^*| \rightarrow \min, x \in X,$$

так и любой другой вид нормы.

Рассмотрим наиболее общий подход к решению задач многокритериальной оптимизации.

Назовем решение $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ оптимальным по Парето, если не существует такого $\mathbf{y} \in \mathbf{X}$, что

$$f_i(\mathbf{y}) \geq f_i(\mathbf{x}), i = 1, \dots, m$$

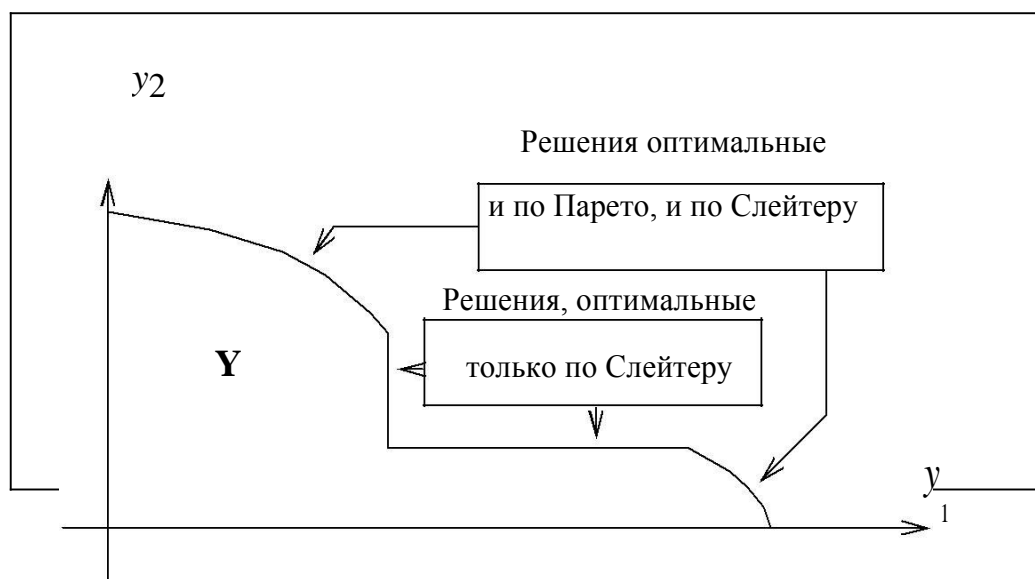
и при этом хотя бы для одного i решение выполняется в строгой форме, т.е. если нельзя улучшить решение хотя бы по одному критерию, не ухудшив его по остальным.

Решение $x \in X$ - оптимально по Слейтеру, если не существует такого $y \in X$, что

$$f_i(y) > f_i(x), \quad i = 1, \dots, m,$$

т.е. если нельзя улучшить решение одновременно по всем критериям. Понятие оптимальности по Слейтеру более широкое, чем оптималь-

ности по Парето. Любая точка, оптимальная по Парето будет оптимальной по Слейтеру, но не наоборот. Продемонстрируем это на следующем рисунке:



Однако и Парето-оптимальные решения дают нам весь спектр оптимальных решений многокритериальной задачи.

Заметим также интересный факт: подставляя различные весовые коэффициенты c_i при решении задачи (13), мы всегда получаем Парето-оптимальное решение. Более того, любое Парето-оптимальное решение яв-

ляется решением задачи (13) при некотором наборе весов c_i . В этом смысле, линейная свертка является самодостаточной.

Можно также использовать это свойство следующим образом. Среди набора целевых функций часто имеется экономический критерий (например, максимизация прибыли), а также другие, не приводимые в явном виде

к стоимостной форме. Например, при выборе вариантов развития производства наряду со стоимостными показателями в качестве критериев могут использоваться показатели различных вредных выбросов в природную среду или показатели экологического риска для населения. Каждому полученному Парето-оптимальному решению данной задачи можно поставить в соответствие весовые коэффициенты c_i , при которых данное решение будет решением и однокритериальной задачи (13). При умножении всех коэффициентов c_i на одно и то же число решение задачи (13) не изменится. Поэтому можно при стоимостном критерии задать единичный весовой коэффициент. Тогда коэффициенты при остальных критериях можно интерпретировать как параметры перевода измеряемых ими показателей в стоимостную форму - например, как удельные ущербы от вредных выбросов или от повышения риска для здоровья населения.