

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ СЛОЖНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ В СФЕРЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

С.С. Толстых, В.Е. Подольский, В.В. Бучнева

Тамбовский государственный технический университет

392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106

Аннотация. В статье содержится обзор развития основных понятий теории сложности. Приводится анализ работ И. Пригожина, В.П. Майкова и В.В. Солодовникова. Раскрыты особенности перехода качественных характеристик сложности в количественные оценки. Показана актуальность нового направления – теории структурной сложности – в телекоммуникационных системах большой размерности.

Annotation. Paper contains the browse of development the complexity theory main concepts. The analysis of operations I. Prigogine, V.P. Maykov and V.V. Solodovnikov is reduced. The features of complexity qualitative characteristics transition in quantitative assessments are uncovered. The urgency of a recent trend – structural complexity theory in telecommunication systems of large dimension is rotined.

1. Базовые концепции и предпосылки теории сложности

Современная цивилизация находится сейчас на столь высокой ступени в познании деталей окружающего ее мира, что можно все более часто и с возрастающим профессионализмом говорить о структурах и об их сложности. В то же время мир, все, что нас окружает – это множество сложных систем. Познавая сложность систем, мы начинаем понимать структуру мира в целом, и это является важным обстоятельством в кардинальном решении многих проблем.

Приведем несколько определений понятию «система» [5, 11, 14-16].

1. Система (от греч. *systema* – целое, составленное из частей; соединение), совокупность множества элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство.
2. Система – это сложный комплекс, функционирование которого как целого зависит от составляющих его частей и от взаимодействия между этими частями.
3. Система – совокупность (множество) отдельных объектов с неизбежными связями между ними.

Термин «система» является ключевым для многих областей знаний. Если же определение системы не рассматривается в контексте конкретной дисциплины, но при этом является объектом изучения (для теории систем, системного анализа и теории сложности), то следует ввести некоторую упорядоченность в предмет изучения.

Отметим следующие *свойства* систем:

1. Детерминированность – поведение (реакция) системы однозначно зависит от значений входных параметров. Характерно наличие в системе чётких причинно-следственных связей, причем как в статике, так и в динамике. Детерминированность позволяет применять научный подход в исследовании систем. В теории хаоса, которую иногда отождествляют с теорией сложности, рассматриваются детерминированные системы. Это своего рода терминологический парадокс.
2. Синергетичность – целое (система) является заведомо большим, чем сумма составляющих его частей, что позволяет рассматривать систему в виде

эффективной структуры из составляющих её компонентов. Синергетичность систем часто связывают с характеристиками самоорганизации и способности систем к обучению.

3. Полнота и непротиворечивость – «правильная» система должна быть полна (достаточна для выполнения своих функций и достижения своих целей) и непротиворечива (не должно быть противоречивых целей у всей системы).
4. Иерархичность – компоненты (элементы) системы могут сами рассматриваться в качестве систем (подсистем), а система, как единое целое, может быть подсистемой в системе более высокого уровня. В принципе, деление системы на подсистемы может быть ничем не ограничено, а свойство иерархичности также указывает на то, что элементы системы могут выстраиваться в иерархии.

Перечисленные свойства являются основными для абстрактных систем. Однако существуют другие свойства, которыми могут обладать системы. Такие свойства лучше называть «характеристиками». Более того, для различных типов систем могут иметься различные наборы характеристик, и в этом отношении не может быть замкнутого набора характеристик, выявленных раз и навсегда. Тем не менее, разумно выделить характеристики, которые могут быть свойственны различным типам систем. К ним относятся следующие понятия.

1. Адаптивность – стремление к состоянию устойчивого равновесия, которое предполагает адаптацию параметров системы к изменяющимся параметрам внешней среды.
2. Надёжность – комплексная характеристика системы, определяющая её способность длительно функционировать, сохраняя свои параметры в определённом (заданном) диапазоне. Отдельно здесь можно выделить и свойство отказоустойчивости, под которым понимается продолжение функционирования системы при выходе из строя одного или нескольких её компонентов.
3. Целостность – первичность целого по отношению к частям (на наш взгляд свойство весьма важное). Не элементы составляют систему, а система

состоит из элементов, которые выделяются из неё в рамках системного анализа.

4. Эмерджентность – цели (функции) компонентов системы не всегда совпадают с целями (функциями) системы, при этом для элементов системы в части их взаимодействия друг с другом может нарушаться свойство непротиворечивости – цели компонентов могут быть противоречивы друг другу, но при этом цели системы всё также должны быть непротиворечивыми.
5. Взаимодействие и взаимозависимость системы и среды – система действует в среде и зависит от неё, равно как и наоборот. Система может обмениваться со средой материей, энергией и (или) информацией.
6. Обучаемость – возможность перенастройки функций и целей системы в зависимости от изменения параметров внешней среды. Система может быть самообучаемой, когда функции и цели перенастраиваются на основании внутренних факторов.
7. Целенаправленность – существование у системы *цели*. Некоторые школы исследователей систем выделяют эту характеристику в виде непреложного свойства, которым должны обладать все системы (например, экономисты).
8. Динамичность – развитие системы происходит в динамике, т.е. система изменяется во времени. Так, к примеру, уже упомянутая теория хаоса изучает развитие нелинейных динамических систем.

Для полноты понимания системы как объекта изучения, опираясь на вышеперечисленные свойства, можно осуществлять классификацию систем по разным критериям.

1. По отношению системы к окружающей среде:

- открытые (есть обмен ресурсами с внешней средой);
- закрытые (нет обмена ресурсами с внешней средой).

2. По происхождению системы (элементов, связей, подсистем):

- искусственные (орудия, механизмы, машины, автоматы, роботы и т.д.);

- естественные (живые, неживые, экологические, социальные и т.д.);
- виртуальные (воображаемые и, хотя реально не существующие, но функционирующие так же, как и в случае, если бы они существовали);
- смешанные (экономические, биотехнические, организационные и т.д.).

3. По описанию переменных системы:

- с качественными переменными (имеющими лишь содержательное описание);
- с количественными переменными (имеющие дискретно или непрерывно описываемые количественным образом переменные);
- смешанного описания (количественно-качественное).

4. По типу описания закона (законов) функционирования системы:

- типа "черный ящик" (полностью неизвестен закон функционирования системы; известны только входные и выходные сообщения);
- не параметризованные (закон функционирования не описан; система содержит символические неизвестные параметры; известны лишь некоторые априорные свойства закона функционирования);
- параметризованные (закон известен с точностью до параметров и его можно отнести к некоторому классу зависимостей);
- типа "белый (прозрачный) ящик" (полностью известен закон).

5. По способу управления системой:

- управляемые извне системы (без обратной связи, регулируемые, управляемые структурно, информационно или функционально);
- управляемые изнутри (самоуправляемые или саморегулируемые, программно-управляемые, регулируемые

автоматически, адаптируемые – приспособляемые с помощью управляемых изменений состояний, и самоорганизующиеся – изменяющие во времени и в пространстве свою структуру наиболее оптимально, упорядочивающие свою структуру под воздействием внутренних и внешних факторов);

- с комбинированным управлением (автоматические, полуавтоматические, автоматизированные, организационные).

6. По принадлежности к исследуемой области:

- социальная;
- экономическая;
- политическая;
- биологическая;
- информационная;
- техническая.

7. По мере участия человека (авторские концепции):

- природная;
- техническая;
- гуманитарная.

Теория сложности, теория систем и системный анализ развивают аналитический аппарат для изучения систем в самом общем виде, стараясь выработать универсальный набор правил. Но чтобы лучше понять суть теории сложности, необходимо рассмотрение некоего частного случая, причем наиболее удобного для анализа, структурирования и моделирования. Такими системами являются *технические системы*, которые легче других поддаются *структурированию и математическому моделированию*.

Определим термин «техническая система». Для этого понадобится вышеприведенная классификация систем по участию в них человека.

В *природной системе* для ее функционирования присутствие человека совершенно необязательно; более того, даже нежелательно. В процессах существования и развития дикой природы человек не играет значимой или созидательной роли: человек своей волей не формирует популяции животных и

растений и их взаимодействие на обширных территориях (если не принимать во внимание вред, наносимый природе). Здесь вступают в силу естественные законы, множественные случайные факторы, неподконтрольные человеку. Для познания такой системы необходимо сначала проанализировать все процессы, происходящие в ней и вокруг нее. Затем синтезировать систему при помощи доступных средств макетирования, чтобы понять, как воздействовать на объект изучения, не уничтожив его. В конечном итоге говорить о выводах следует только с учетом больших вероятностных приближений. В итоге в расчеты вкрадывается неточность оценок вплоть до опровержения.

Для *гуманитарной системы* основными элементами функционирования являются люди, а связями между элементами служат взаимоотношения. Здесь законы функционирования, отношения и цели определяются только волей людей, их стремлениями, склонностями, привычками и амбициями. Гуманитарная система – это система отношений внутри человеческого общества. Как известно, они открыты внешнему воздействию случайных факторов, изменчивы и вообще свободны. Здесь так же, как и для природной системы, велика вероятность ошибки при макетировании и расчетах, трудно определяема конечная цель, иногда уместно говорить о наличии у гуманитарной системы нескольких целей, часто противоречащих одна другой.

Для *технических систем* составными элементами является все то, что создал или продолжает создавать человек в процессе развития цивилизации и обустройства своего существования на Земле. Это все инструменты, приборы и сооружения, которыми человек отделил себя от природы. Здесь законы функционирования диктуются потребностями человека в улучшении устройства своего быта, т.е. в получении некоторой пользы через решение конкретно поставленной и четко формализованной технической задачи. Главной чертой технической системы является то, что ее сначала проектируют, а затем реализуют.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что структура технической системы изначально известна, в отличие от природной или гуманитарной, где сначала идет анализ, а только затем синтез. Следовательно, техническая система легче поддается *структурированию и математическому моделированию*, чем какая-либо другая.

Что является для технической системы ее структурой? По определению системы как *взаимосвязанной совокупности элементов*, вполне очевидно следующее заключение: само существование элементов и связей между ними заведомо предполагает наличие структуры.

Структура в ее детерминированном понимании есть внутренняя форма организованности элементов системы, проявляющаяся в виде постоянных связей и единстве условий их определения.

Если элементы (компоненты, части) объекта и связи между ними зафиксированы, то мы имеем дело уже с определенной абстракцией объекта— со схемой. Схема, состоящая из элементов и связей, ещё не является структурой. Структура есть абстракция системы, в случае которой интересуются не столь эмпирическими свойствами элементов, сколь видами их организованности. Целостная структура, отражающая свойства симметрии и асимметрии, есть качественная абстракция объекта. А некоторая совокупность чисел может оказаться количественной абстракцией реального объекта. Заметим, что структура выступает интегрирующим фактором системы и детерминирует ее качество.

Если система имеет некоторую структуру, то можно ввести понятие *модели*.

Модель – упрощенное представление о реальном предмете, процессе или явлении. Это, как правило, искусственно созданный объект в виде схемы, совокупности математических формул, физической конструкции, наборов данных и алгоритмов их обработки и т.п. Также можно сказать, что *модель* – это объект, используемый вместо другого объекта с какой-то целью.

При классификации моделей выделяют основные признаки классификации моделей:

- область использования;
- учет в модели временного фактора (динамики);
- отрасль знаний;
- способ представления моделей.

Один и тот же объект может иметь множество моделей, а разные объекты могут описываться одной моделью.

Моделирование – это метод познания, состоящий в создании и исследовании моделей.

Каждый объект имеет большое количество различных свойств. В процессе построения модели выделяются главные, наиболее существенные, свойства. Так, модель самолета должна иметь геометрическое подобие оригиналу, модель атома – правильно отражать физические взаимодействия, архитектурный макет города – ландшафт и т.д.

Основной задачей процесса моделирования является выбор наиболее адекватной к оригиналу модели и перенос результатов исследования на оригинал. Существуют различные методы и способы моделирования. В частности, рассмотрим такое понятие как «алгоритм».

Алгоритм – это заданная последовательность строго формализованных действий, совершаемых исполнителем над информацией, переданной ему для преобразования и получения конечного решения. При этом должны выполняться следующие требования:

- после каждого шага указывается, какой шаг следует выполнять дальше, либо указывается, когда следует работу алгоритма считать законченной;
- останавливаться после конечного числа шагов (зависящего от исходных данных) с выдачей результата;
- наличие механизма реализации, который по описанию алгоритма порождает процесс вычисления на основе исходных данных.

Исходя из требований, необходимых для формализации алгоритма и понимания термина «модель» тождественно термину «алгоритм», можно заключить, что при построении модели технической системы следует соблюдать три вышеприведенных правила. Чем труднее выполнить эти правила, тем сложнее моделируемая система. Т.е. *в оценку сложности системы вложена сложность оценки ее модели или алгоритма.* Попробуем теперь разобраться в понятии сложности, уяснить, какими путями возможно ее преодолеть, опираясь на рассмотренные выше термины: «система», «структура», «модель» и «алгоритм».

Понятия «сложность» будем рассматривать в контексте моделей технических систем. Сначала проанализируем качественные критерии.

Сложность в интуитивном понимании во многом схожа с трудоемкостью. Нельзя абстрагироваться от области, для которой системы проектируются и анализируются. Ведь сложность одной системы возможно определить только относительно другой, некоторой эталонной системы.

Как правило, понятие «сложность» используется в сравнительной нотации. Оценка сложности может производиться на качественном уровне: «первый вариант сложнее второго», «третий вариант самый сложный» и т.п. – на множестве альтернативных вариантов выстраиваются *бинарные отношения порядка*.

При оценивании сложности, можно рассматривать всю систему целиком, не вникая во взаимосвязи элементов. Тогда такой анализ называется «поиском в ширину». Но если же нас больше интересует структура конкретной подсистемы, ее локальные связи, то уместно говорить о «поиске в глубину».

Для количественного познания сложного – формализации сложности – используется, как правило, кибернетический подход. Исходное явление необходимо, прежде всего, снабдить математической моделью. Применительно к этой модели разрабатывается критерий сложности. Основанием для его разработки служит набор непротиворечивых аксиом (аксиоматика сложности).

Если в нашем распоряжении имеется процедура количественной оценки сложности, то ее можно использовать, например, для сравнения альтернативных вариантов, упорядоченных по сложности. В качестве вариантов могут выступать математические описания различных явлений, варианты компьютерных сетей, варианты конструктивного оформления материальных объектов, различные схемы движения и развития в технико-экономических приложениях, разработки программного обеспечения, системы управления и т.д.

Количественная оценка сложности – как необходимость – возникает при неочевидности, невозможности (или бесполезности) назначения качественных (семантических) оценок сложности моделируемым явлениям. В этом случае определяется «система», для полноты рассмотрение вводится понятие «структура системы». Подразумевается, что структура системы может стать предметом наблюдения. Сами же системы, на концептуальном уровне, становятся *структурно сложными*.

2. Хаос и сложность

Теория хаоса и сложности – это новая научная парадигма. Системы находятся в постоянном движении, взаимодействиях с внешней средой, перерабатывая информацию и осуществляя обратную связь. Стадии динамического покоя перемежаются со стадиями настолько сложными, что производят впечатление полного и непредсказуемого хаоса. Порядок рождается из беспорядка в процессе самоорганизации, но в определенный момент «ослабленная» стабильностью система вновь дает рождение хаосу.

В теории сложности существуют шесть основных теоретических понятий, присущих системам: (1) чувствительность к первоначальным условиям, (2) странные аттракторы, (3) самоидентичность, (4) самоорганизация, (5) край хаоса и (6) холмистый ландшафт.

Исследования Лоренца и других ученых доказали [10, 14, 15], что долгосрочное прогнозирование невозможно *во всех открытых сложных системах*. Малейшее изменение первоначальных условий приводит к иным результатам. В то же время во всех этих результатах, как бы они ни отличались друг от друга, присутствовал единый, общий для всех паттерн. Кроме того, Лоренц продемонстрировал, как модели с разными начальными условиями приводили к одному и тому же результату. Казалось, что непредсказуемые системы, тем не менее, «тянутся» или «привлекаются» к определенным упорядоченным структурам. Отсюда происходит термин «аттрактор» от английского слова attract – «привлекать». Сначала этот феномен назывался «аттрактор Лоренца», но сегодня более распространенным является термин «странный аттрактор» (его положение в фазовом пространстве хаотично меняется). Процессы, происходящие в системе, никогда в точности не повторяются, но они всегда остаются в рамках определенного паттерна. Последователи теории хаоса утверждают, что все открытые системы, изучаемые физикой, химией, биологией, следуют странным аттракторам, т.е. приходят в равновесие всякий раз к разным точкам фазовой плоскости.

Другой интересной особенностью систем, следующих странным аттракторам, является то, что они демонстрируют самоидентичность, которая проявляется в том,

что подсистема имеет очевидное, хотя и не идеальное, сходство с системой в целом. Такие типы структур называются фрактальными. Один из наиболее простых примеров фрактальных структур – снежинки, у которых каждый уровень разветвлений является как бы копией структуры в целом, хотя и никогда не повторяющейся.

Сложные адаптивные системы обладают также способностью к самоорганизации. Кажется, будто порядок вдруг появляется прямо из хаоса. Первым открыл и описал процессы самоорганизации Илья Пригожин, лауреат Нобелевской премии по химии в 1977 году за работу по диссипативным структурам. Традиционная химия, утверждает Пригожин, работает с системами, находящимися в состоянии термодинамического баланса [5]. Если система выходит из состояния баланса, например, под воздействием петель положительной обратной связи, она может разрушиться. Пригожин продемонстрировал, что при определенных условиях химическая система может пройти через состояния хаоса не только не разрушившись, но и перейдя в новое состояние благодаря процессу самоорганизации. Открытые системы, находящиеся в неравновесном состоянии, могут самоорганизовываться, если уже в самой системе заложены предпосылки для этого. В процессе самоорганизации система вновь приходит к устойчивому состоянию на более высоком уровне сложности.

Феномен «границ хаоса» был независимо открыт Норманном Паккардом и Крисом Лэнгтоном. Граница хаоса – это узкая зона между системой, еще находящейся в состоянии порядка, и хаосом, разрушающим систему. Именно в этой зоне системы, находящиеся в шаге от смерти, вдруг проявляют неожиданные способности к созданию новых адаптивных структур, спасающих их от разрушения и восстанавливающих равновесие. Именно в системах, находящихся на границе хаоса, проявляются процессы самоорганизации, обнаруженные Пригожиным.

Кауфман, занимавшийся исследованиями в области медицины в Институте Санта Фе, является автором еще одной концепции теории сложности, которая называется «холмистым ландшафтом». В основе этой концепции лежит понимание, что открытые системы живут только благодаря среде, которая в свою очередь состоит из других систем. Кауфман представлял среду сосуществования систем, как холмистый ландшафт, география которого является непредсказуемой для каждой из систем.

Каждый из холмов ландшафта, символизирующий успех и высокую эффективность, отделен от другого холма низинами, отличающимися нестабильностью, низкой эффективностью и дисбалансом. Жизнь любой системы – это путешествие по такому холмистому ландшафту. Забраться на вершину помогает или случай, или целенаправленная деятельность. Однако, достижение новых вершин может быть чрезвычайно рискованным, т.к. для этого приходится проходить через «предательские низины». Любая вершина будет опускаться и постепенно превращаться в низину, если на ней находится слишком много систем. Точно также низина, покрываясь толстым слоем, может «подрасти» и превратиться в холм.

3. Сложность по Пригожину

Мир, по глубокому убеждению И.Пригожина, его учеников и соратников, состоит из неустойчивостей и флуктуаций, именно они порождают разнообразие и богатство форм и структур природы. Цель разработок И.Пригожина – методы исследования сложных систем, независимые от приложений (от молекул до социальных систем) [5, 16].

Особо подчеркивается, что в основе изучения сложных явлений находятся два научных направления: физика неравновесных состояний, исследующая новые свойства веществ в условиях сильного отклонения от равновесия, и теория динамических систем, в которых преобладают неустойчивости, причем изначально малые изменения с течением времени усиливаются.

В основании постулатов сложности Пригожина – *сложность в природе*. По словам Пригожина – «сложность представляет собой понятие, принадлежащее обиходному словарю», и всегда соседствует с *понятием простоты*. Многие явления в природе интуитивно рассматриваются как *простые* (действие сил тяжести, механические взаимодействия, описываемые «школьными» формулами). Понятие сложности во многом интуитивно и психологично: экономическая система в масштабах страны, человеческий мозг и даже простейшие микроорганизмы представляются *сложными*, или, говоря иначе, малоизученными.

Подчеркивается, что большие количества не всегда способствуют представлениям о сложности. Приводится пример системы: 1 см³ воды, содержащий примерно 10 миллиардов молекул, движущихся во всевозможных направлениях и непрерывно сталкивающихся друг с другом. Задается вопрос: достаточно ли такого гигантского количества, чтобы считать систему «сложной»? Отрицательный ответ на данный вопрос порождает понятие молекулярного хаоса – молекулы действуют несогласованно и «не распознают друг друга, если расстояние между ними превышает несколько ангстрем».

Приводится замечательный пример с тем же кубиком воды, помещенным в среду с отрицательной температурой, когда из воды возникает снежинка, структура которой, безусловно, сложна. Таким образом, одна и та же система может в разных

условиях быть как простой, так и сложной. Пригожин предлагает взамен анализа сложных систем заниматься рассмотрением сложного поведения, если это оправдано целями и задачами конкретного исследования (что можно трактовать как постановку задачи таким образом, чтобы исследование сложного поведения было продуктивнее структурного анализа).

Большое значение в рождении сложного пространственного явления имеет самоорганизация: от микроскопических взаимодействий происходит переход к макроскопической картине, которым присуща сложная структура (пространственная сложность).

Замечательным примером рождения сложности являются ячейки Бенара – небольшие, порядка 1 мм^3 ячейки жидкости (воды), капля которой находится в пространстве между двумя бесконечными пластинами. В условиях равновесия, при комнатной температуре, происходит структурирования пласта жидкости на ячейки с ламинарным круговым течением молекул. С позиций структуры каждая из ячеек Бенара является сугубо независимой от других, т.е. фактически структуры нет. При точечном температурном воздействии (возмущении, прилагаемом к системе) возникает макро-структура из ячеек Бенара, причем строго детерминированная. При увеличении температуры точечного воздействия структура вновь разрушается – возникает хаос в виде турбулентности, сложность системы резко уменьшается.

Помимо пространственной сложности, интерес представляет временная сложность, возникающая, например, в химических реакциях. В условиях, далеких от равновесия, могут возникать сложные осцилляции концентраций веществ, вступающих в реакцию, порой их невозможно ни предсказать, ни описать. Происходит это обычно при сужении пространства химического реактора и соответствующим сокращением времени пребывания реакционной смеси (так называемые «химические часы»).

И.Пригожин ввел в рассмотрение «Словарь сложного». В его составе ряд понятий.

3.1. Консервативные системы

В таких системах (пример – окружающий нас мир в целом) существует, по крайней мере, один *первичный элемент* (параметр), не подверженный изменениям, несмотря на действия внешних факторов и разнообразие всех возможных взаимодействий элементов системы.

Многие физические системы могут рассматриваться как консервативные: при любых состояниях таких систем существуют некоторые параметры, остающиеся неизменными. Например, система из двух частиц, движущихся в трехмерном пространстве, является консервативной; на неизменном уровне остаются полная энергия (сумма энергий, кинетической и потенциальной), полное количество движения и его полный момент. Физические законы сохранения, лежащие в основе многих консервативных систем, приводят к важному свойству такого рода систем: они безотносительны к направлению развития (движения), т.е. наряду с прямым ходом эволюции (и, соответственно, времени) существует и обратная эволюция (обратное время), причем их траектории совпадают.

Для консервативных систем характерной чертой является возможность исчерпывающего описания структуры сложного поведения в *фазовом пространстве*, где координатами являются измеряемые (или вычисляемые) величины и обязательно существование точки равновесия, где скорость и ускорение развития равны нулю. На фазовом портрете каждая точка находится на определенной траектории, где первичный элемент постоянен (например, энергия).

Существенно заметить, что многие консервативные системы являются структурно неустойчивыми: малейшее нововведение может вывести систему из этого ранга. Примерами «усовершенствованных» консервативных систем с малой структурной устойчивостью являются: система из двух маятников, соединенных пружиной, система трех тел в пространстве (так называемая задача о трех телах).

С позиций получения знаний, специалистам по математическому моделированию порой выгодно рассматривать некоторые системы как консервативные, чтобы избежать *предела знаний*, получая взамен реальные возможности хоть каких-то

расчетов. Обычно это достигается за счет всякого рода *допущений несущественности* (пренебрежения чем-либо).

3.2. Диссипативные системы

Это, прежде всего, системы, в которых могут возникать или имеют место *необратимые процессы*. По отношению к сложности, существуют две тенденции: 1) необратимость и диссипация; 2) эволюция. В первом случае сложность уменьшается, во втором – увеличивается. С темпоральных позиций, диссипативные системы отнюдь не безразличны к направлению времени; в них нет места обратному времени. Большинство отдельно взятых явлений и процессов нашего мира являются сугубо диссипативными, если их возводить в ранг системы: системы с трением, химические превращения, теплопроводность, диффузия и др.

3.3. Равновесие и неравновесные ограничения

Диагностика равновесия в системе подразумевает, что есть некие параметры, безотносительные к структуре этой системы и эти параметры при определенном стечении обстоятельств могут зафиксироваться на постоянном уровне. Обычно, это макро-показатели: температура, давление, концентрация.

В физических системах различают два основных вида равновесия: механическое и термодинамическое. Именно термодинамическое равновесие представляет наибольший интерес с позиций использования постулатов И.Пригожина в информационных системах. В том случае, если в системе действует математическое описание лишь одной единственной величины, равновесие можно считать термодинамическим, когда система открыта к действию внешней среды, этот единственный параметр является к тому же единственной характеристикой воздействия среды на систему, и они равны. Если система подвержена влиянию внешней среды со многими факторами, ее характеризующими, то состояние равновесия диагностируется равенством всех факторов.

Систему порой невыгодно рассматривать во взаимодействиях со средой ее окружающей. Существует понятие «изолированная система»: она характерна тем, что в каком бы состоянии не находилась, нет никакого смысла учитывать параметры внешней среды, т.е. можно считать, что вне системы нет абсолютно ничего. Тогда состояние равновесия называют стационарным состоянием системы. На макроуровне стационарное состояние характеризуется нулевыми скоростями протекания каких-либо процессов. На микроуровне, при максимальной детализации, отмечается обратимость времени системы и существуют локальные силы внутреннего возмущения, равные силам, которые им противодействуют. Пригожин, в соответствии с этими тенденциями, вводит понятие *детального равновесия*, которое является связующим звеном между консервативными и диссипативными системами.

Неравновесное состояние, присущее системе, является результатом действия *неравновесных ограничений*, как правило, формируемых человеком. Эти действия человек направляет на поддержание устойчивого дисбаланса фазовых координат системы. Примерами рукотворных неравновесных систем может служить большинство химических непрерывных производств, атомные реакторы и многие другие сложные системы.

Неравновесные диссипативные системы могут иметь несколько устойчивых неравновесных состояний, расположенных в строгом порядке во времени или в пространстве, а необратимый переход от одного к другому называют *бифуркацией*.

3.4. Линейность систем и управление

Управление системой подразумевает, как правило, наличие обратных связей. Если рассматривать диссипативную систему, имеющую связь с внешней средой и этой средой является человек или управляющий агрегат (регулятор), то действия, направленные в сторону системы, можно считать идущими в прямом направлении, а параметры, способствующие принятию управленческих решений, идут в обратном направлении, т.е. налицо обратная связь. Пригожин рассматривает линейность как свойство разности стационарных состояний системы находиться в прямо пропорциональной зависимости от величины управляющего воздействия. Такие

системы являются, в контексте статики, точкой отсчета сложности. Фактически любая нелинейность, вносящая отклонения в эту зависимость приносит системе, имеющей обратную связь, дополнительную сложность. Существует немало систем, которые ведут себя линейно в некоторой окрестности и перестают быть таковыми вне этой области. Одним из важнейших факторов сложности, вносимых нелинейностями, является *неоднозначность*. Так, если, например, в математическом описании систем присутствуют алгебраические уравнения, становится очевидным наличие нескольких решений, налицо неоднозначность, повышенная сложность. И.Пригожин называет подобные явления «диверсификацией типов поведения системы».

3.5. Многогранность второго закона термодинамики

В изолированных системах ход эволюции предопределен и обусловлен только начальными условиями. В случае диссипативных систем поиск эволюционных законов осложняется. В отсутствие инвариантности математического описания таких систем к обратимости времени, вполне очевиден неизбежный приход к состоянию, в котором время не участвует – к статике. В случае изолированных систем тенденция к необратимости выражается *вторым законом термодинамики*. В соответствии с этим законом существует функция S переменных состояния системы (*функция состояния*), которая при приближении к равновесному состоянию (термодинамическому равновесию) монотонно возрастает

$$\frac{dS}{dt} \geq 0.$$

Такой функцией является энтропия. Она характеризует число возможных состояний системы. С физических позиций, минимальной энтропией характеризуется твердое тело, находящееся при температуре, стремящейся к абсолютному нулю. Важно отметить, что в отсутствие внешних воздействий *термодинамическое равновесие* целиком определяется только межмолекулярными взаимодействиями.

В условиях взаимодействия с внешней средой второй закон термодинамики подразумевает, что скорость изменения энтропии открытой системы складывается из производства энтропии за единицу времени, свойственного системе, и потока энтропии

извне. В обобщенном Пригожиным втором законе термодинамики первое слагаемое (скорость роста внутренней энтропии) неотрицательно, а второе – не имеет ограничений на знак. В этих условиях оказывается, что, управляя потоком энтропии извне, можно добиться как положительного, так и отрицательного прироста энтропии всей открытой системы в целом. Это можно представить как

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_e}{dt}, \frac{dS_i}{dt} \geq 0,$$

где S_i – внутренняя энтропия, S_e – внешняя энтропия.

Приход системы в состояние равновесия в работах Пригожина отождествляется с устойчивостью по Ляпунову. Фактически, энтропия и есть знаменитая функция Ляпунова, поиск которой в каждом конкретном случае помогает решать многие задачи управления.

3.6. Сложность динамических систем

Динамические системы характерны отсутствием равновесия. Движение в системе может осуществляться как к состоянию полного равновесия (глобальному аттрактору), так и к устойчивому неравновесному состоянию, последнее вносит существенный вклад в повышение динамической сложности.

Минимальная динамическая сложность соответствует неподвижным точкам в фазовом пространстве. Сложность увеличивается, если в фазовом портрете системы наблюдаются замкнутые кривые, характеризующие колебательные процессы.

Изучение сложности динамических систем во многом относится к общей теории динамических систем. На качественном уровне динамическая система тем сложнее, чем больше в ней всевозможных локальных аттракторов, особенно неперiodических (фракталов).

Особо сложными представляются дискретные динамические системы. Пригожин первым высказывает предположение о наличие аттракторов в вычислительных сетях. Причем количество таких аттракторов тем больше, чем выше размерность сети. Однако усилия, направленные на соединение достижений теории сложности в физических средах и достижения в области моделирования компьютерных

сетей ограничились к настоящему времени к использованию распределения Пуассона: по сути дела идеализации реальности.

Идеи использования распределения Пуассона, по всей видимости, также впервые появились в середине 80х в совместных работах И.Пригожина и Г.Николиса.

3.7. Алгоритмическая сложность

Пригожин затрагивает и это сугубо кибернетическое понятие в своих работах. Ставится вопрос: можно ли как-то сопоставить алгоритмическую и физико-химическую сложность? Алгоритмическая сложность представляет собой длину самого короткого способа записи конечной последовательности знаков. В этом смысле некоторая совершенно случайная последовательность, порождаемая шумовым процессом, имеет максимальную сложность, равную длине этой последовательности. Противоположной ситуацией являются последовательности вида XXX...XXX, ведь для их воспроизведения достаточно одной единственной инструкции. Характерно, что в последовательностях с минимальной алгоритмической сложностью количество информации также минимально.

Отмечается, что сложность физико-химических процессов находится, с точки зрения теории информации, где-то между минимальной алгоритмической сложностью и сложностью представления случайного состояния.

Для моделирования компьютерных сетей с использованием оценок сложности работы Пригожина дают важнейшее направление в параметризации информационных связей: сложность перехода информации от одного узла к другому прямо пропорционально количеству информации, которое фиксируется в заданный момент времени или усредняется за некоторый период.

4. Энтропийные методы моделирования сложных процессов

В данных методах используется понятие «информационная энтропия» и принцип максимального правдоподобия. Наиболее обстоятельно эти вопросы рассмотрены в работах В.П.Майкова, квинтэссенцией которых можно считать книгу [32]. Информационная энтропия выступает в роли критерия правдоподобия – максимуму информационной энтропии соответствует наиболее правдоподобный (достоверный) ответ на поставленную задачу.

Утверждается, что в условиях неполной информации, а это свойственно практически всем сложным процессам, когда-либо кем-либо изучаемых, только информационный подход следует рассматривать как наиболее беспристрастный подход, базирующийся на совокупности неполных знаний.

Наибольший интерес представляют процессы, происходящие вдали от термодинамического равновесия. Энтропийные методы дают возможность решать задачи без сведения неравновесных состояний к совокупности равновесных, более того, из полученного решения легко получить равновесные состояния, как предельные точки.

Информационная энтропия дискретного множества представляет собой

$$H = -N \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i,$$

где N – число опытов, каждый из которых позволяет получить вероятности состояний с номерами $i = \overline{1, n}$, число n характеризует множественность состояний системы.

Информационная энтропия непрерывного множества $X = \{x \in [a, b]\}$ вычисляется по формуле

$$H = - \int_a^b p(x) \ln p(x) dx,$$

где $p(x)$ – плотность распределения вероятности случайной величины x .

Из всех законов распределения можно выделить два важнейших закона:

1. равномерный – он соответствует максимальной информационной энтропии $H = \ln(b - a)$. Если $b - a = 1$, информационная энтропия принимает нулевое значение.

2. нормальный – если поставить задачу поиска максимальной информационной энтропии при жестком ограничении $\int_a^b x^2 p(x) = \sigma^2$, где σ

– заданное значение среднеквадратичного отклонения, то окажется, что единственная функция, доставляющая максимум энтропии H из всех

плотностей распределения есть $p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$.

В процессе познания сложного можно выделить два уровня информационной энтропии: до проведения опытов H и после H_1 . Тогда разность $J = H - H_1$ есть не что иное, как количество информации. Если в результате познания неопределенность снизилась до нуля ($H_1 = 0$), что само по себе редкое явление, то возникает парадоксальное равенство потенциала (энтропии) и разности потенциалов (информации): $J = H$.

Количество информации, равно как и информационная энтропия, измеряются в битах. Вообще говоря, один бит – это количество информации, сообщаемое о том, какое именно из двух равновероятных событий произошло, тем самым один бит – это количество информации, уменьшающее вдвое меру неопределенности.

Важнейшим обстоятельством, подмеченным и доказанным Майковым, является тот факт, что термодинамическая энтропия, относящаяся к неопределенности на микроуровне, трансформируется без каких-либо структурных деформаций в решении практических задач математического моделирования в информационную энтропию: они отличаются только постоянным множителем, постоянной Больцмана. При поиске максимума это более чем удачное соответствие!

Практическим аспектом решения задач моделирования посредством информационной энтропии является известный формализм Джейнса – принцип максимальной энтропии (заметим здесь, что этот формализм подвергался критике и

сомнениям в работах И.Пригожина, но в точности так и не был опровергнут). Это, по сути дела, аксиоматическая теория.

Уникальным достижением Майкова является то обстоятельство, которое является, безусловно, преодолимым, если воспользоваться формализмом Джейнса – проблема идентификации математических моделей. В традиционном математическом моделировании данная проблема настолько серьезна, что порой ставит под сомнение саму возможность использования моделей, особенно, если в идентификации участвует существенный по размеру ряд искомых параметров. Парадокс состоит в том, что если удалось сформулировать задачу оптимизации на основе информационной энтропии, получаемое решение не является в полном смысле точным, а лишь наиболее правдоподобным, тем не менее, любые традиционные математические модели, будучи использованными в тех же задачах, также построены на неполных знаниях и, соответственно, не могут претендовать на точность в глобальном смысле этого слова.

5. Понятие сложной системы как системы сложного поведения

В настоящее время в среде экономистов стали появляться работы по исследованию сложности, порождаемой сложным поведением систем. Приведем обобщенное изложение работ, подобных монографии [4].

Система называется сложной, если в ней не хватает ресурсов (главным образом, информационных) для эффективного описания (состояний, законов функционирования) и управления системой - определения, описания управляющих параметров или для принятия решений в таких системах (в таких системах всегда должна быть подсистема принятия решения).

В сложных системах результат функционирования не может быть задан заранее, даже с некоторой вероятностной оценкой адекватности. Причины такой неопределенности - как внешние, так и внутренние, как в структуре, так и в описании функционирования, эволюции. *Сложность этих систем обусловлена их сложным поведением.*

Чем определяется сложность систем?

Прежде всего, сложность системы зависит от принятого уровня описания или изучения системы - макроскопического или микроскопического. Сложность системы может также определяться не только большим количеством подсистем и сложной структурой, но и сложностью поведения.

Сложность системы может быть внешней и внутренней.

Внутренняя сложность определяется сложностью множества внутренних состояний, потенциально оцениваемых по проявлениям системы и сложности управления в системе.

Внешняя сложность определяется сложностью взаимоотношений с окружающей средой, сложностью управления системой, потенциально оцениваемых по обратным связям системы и среды. С последним утверждением авторы данной статьи не согласны: на наш взгляд нельзя рассматривать сложность открытых систем без распространения размерности систем на ту часть внешнего мира, которая оказывает влияние на исследуемую систему. Если продолжать рассмотрение подобным образом

все шире и шире, процесс расширения невозможно остановить, смысл системы, как совокупности конечного числа элементов теряется.

Типизация сложности систем зависит от того, каких ресурсов не хватает:

- структурной или организационной (не хватает ресурсов для построения, описания, управления структурой);
- динамической или временной (не хватает ресурсов для описания динамики поведения системы и управления ее траекторией);
- информационной или информационно-логической, инфологической (не хватает ресурсов для информационного, информационно-логического описания системы);
- вычислительной или реализации исследования (не хватает ресурсов для эффективного прогноза, расчетов параметров системы, или их проведение затруднено из-за нехватки ресурсов);
- алгоритмической или конструктивной (не хватает ресурсов для описания алгоритма функционирования или управления системой, для функционального описания системы);
- развития или эволюции самоорганизации (не хватает ресурсов для устойчивого развития, самоорганизации).

Чем сложнее рассматриваемая система, тем более разнообразные и более сложные внутренние информационные процессы приходится актуализировать для того, чтобы была достигнута цель системы, т.е. система функционировала или развивалась.

Структурная сложность системы оказывает влияние на динамическую, вычислительную сложность. Изменение динамической сложности может привести к изменениям структурной сложности, хотя это не является обязательным условием. Сложной системой может быть и система, не являющаяся большой системой; существенным при этом может стать связность (сила связности) элементов и подсистем системы.

Сложность системы определяется целями и ресурсами (набором задач, которые она призвана решать).

При определении меры сложности системы важно выделить инвариантные свойства систем или информационные инварианты и вводить меру сложности систем на основе их описаний.

Другим весьма интересным направлением исследования сложного являются работы В.В. Солодовникова.

Когда Илья Романович Пригожин в 1977 году получил Нобелевскую премию, в этом же году вышла в свет книга классика теории управления Владимира Викторовича Солодовникова: «Принцип сложности в теории управления» [33]. Уже из самого названия видно, что в данной работе предпринимается попытка конкретизации принципов сложности, их привязки к конкретной области технических систем, синтеза двух дисциплин и попытка на их взаимных достижениях вывести новые подходы к решению управленческих и системных задач. Теория управления занимается оптимизацией разработки, планирования и контроля управления спроектированной и реализованной системы. А теория сложности исследует систему в целом, анализирует сложность ее строения и структуры, внутренних и внешних связей. Рассматриваемые вместе, две эти дисциплины могут способствовать анализу системы со всех сторон и позиций, облегчая тем самым дальнейшее моделирование и синтез.

В 1990 году у Владимира Викторовича Солодовникова, всего за год до его кончины, выходит книга со следующим названием: «Теория сложности и проектирование систем управления» [34]. Как можно заключить из названия, что в данной работе аппарат теории сложности применяется на практике, сформулирована методология количественных оценок, причем для решения весьма важных задач управления: повышение качества, надежности, живучести систем, снижение затрат и сроков разработки. Исходя из аксиоматического определения сложности, сложности проектирования и способов их измерения развит математический аппарат для компьютеризованного синтеза технически оптимальных систем. На базе теории сложности построены модели систем автоматизированного проектирования (САПР САУ), в том числе гибкого (ГАПР САУ).

Необходимость принципиально нового подхода к процессу проектирования, развитию и углублению его теоретических оснований диктуется также потребностями в

сокращении сроков разработки систем, сокращении трудовых и материальных затрат на их разработку без снижения качества и надежности.

6. Структурная сложность: авторские концепции

Общеизвестен термин «вычислительная сложность» – это важная характеристика, сопровождающая решение многих задач с использованием быстродействующих компьютеров и вычислительных кластеров, на базе методов вычислительной математики и теории исследования операций [10]. Исследуются возможности нахождения оценок сложности производимых вычислений как функции размерности задачи. Под сложностью вычислительного метода, как правило, подразумевается количество арифметических или иных операций, затрачиваемых на решение задачи. Прогнозируется влияние возможных изменений в исходных данных на вычислительные ресурсы, требуемые для решения задачи. Оценка вычислительной сложности позволяет сравнивать методы вычислений по их эффективности.

Возьмем пример: вычислительная сложность решения систем линейных алгебраических уравнений методом Гаусса прямо пропорциональна кубу размерности решаемой системы. Зная эту оценку, можно спрогнозировать, во сколько раз увеличится время счета на компьютере, если размерность системы увеличится известным образом.

Многие проблемы современного теоретического и практического программирования тесно связаны с оценкой алгоритмической сложности. Это одна из наиболее актуальных проблем верификации, автоматической генерации программ и ряда других задач программирования. Оценивать сложность программы можно различными способами. Объем исходного модуля программы в байтах – самая простая характеристика ее сложности. Если принять именно эту характеристику программы за ее *сложность*, то небольшая рекурсивная процедура поиска контуров графа может оказаться гораздо проще громоздких инженерных расчетов по эмпирическим формулам, расположенных в программе без каких-либо ветвлений. Однако, на уровне сугубо философских представлений о сложности, можно декларировать, что большинство алгоритмов теории графов многим непонятны и потому сложны.

Предположим, что мы сравниваем сложность той же небольшой программы из теории графов с инженерной программой, размер которой просто огромен – сравниваем их по числу операторов языка программирования. Каким должно быть

количество формул в инженерной программе, чтобы ее вычислительная сложность была одного порядка с реализацией теоретико-множественного алгоритма?

Становится очевидным, что сложность компьютерных программ надо оценивать не только по количеству операторов, но и по другим характеристикам, учитывающим «запутанность» условных переходов, вложенность циклов, итерации, рекурсию и т.п. В основе оценки сложности программ – оценка сложности алгоритма, абстрагированного от языка программирования.

Но как оценить сложность алгоритма? Для этого надо представить алгоритм в виде блок-схемы, перевести ее в ориентированный взвешенный граф, обоснованно назначить вес каждой дуге, ввести в критерий сложности полученный граф и найти искомую сложность.

Термин «сложность» во многом сходен с термином «трудоемкость». Можно воспользоваться, например, стоимостью разработки программ, и этот показатель принять за критерий сложности. Суммарная стоимость затрат на программирование рутинных операторов в логически простой, но громоздкой программе может оказаться на порядок выше стоимости олимпиадной «головоломки». Таким образом, когда мы говорим о сложности программ, нельзя абстрагироваться от области их применения; сравнению подлежат сравнимые варианты программ из одной предметной области.

Как правило, понятие «сложность» используется в сравнительной нотации. Оценка сложности может производиться на качественном уровне: «первый вариант сложнее второго», «третий вариант – самый сложный» и т.п. – на множестве альтернативных вариантов выстраиваются бинарные отношения порядка. Качественная оценка сложности базируется чаще всего на знаниях экспертов, на их опыте; не исключены и догмы.

Для исследования структурной сложности структура системы ассоциируется с понятием «ориентированный взвешенный граф». Сложность графа, очевидно, зависит от числа вершин графа, числа его дуг и, возможно, от числа контуров [15]. Становится возможным использование традиционных представлений теории графов для оценки структурной сложности.

Характеристики графа необходимо трансформировать в конкретные, алгоритмически выверенные процедуры, отвечающие *цели структурного анализа*.

Будет уместна следующая постановка вопроса об оценивании структурной сложности: «Как связать в единый алгоритм этапы отображения множеств, однозначно характеризующих структуру системы, и этапы вычисления эффективности структурного анализа по отношению к поставленной цели увеличения знаний?» Ответом на поставленный вопрос и будет методология познания структурной сложности.

Особую роль в кибернетике играют *замкнутые системы*. Замкнутые системы могут быть своего рода «срезом», усеченным представлением открытых систем. В противоположность открытым системам они, как правило, *структурно наблюдаемые*.

В замкнутых системах структура является отображением топологической упорядоченности в совокупности моделируемых явлений и, тем самым, ассоциирует в себе разрозненные знания об отдельных объектах конкретной структурно наблюдаемой системы. Сложность замкнутой системы, как правило, измерима, т.е. ее можно представить количественно. Открытые системы можно проимитировать в некотором приближении как замкнутые. Выделяется группа из сильно связанных объектов (взаимно достижимых), своего рода ядро, а внешние связи этой группы представляются в виде дополнительных (фиктивных) объектов, образующих совместно с основной группой замкнутую систему.

Методология математического моделирования систем большой размерности, как может показаться, отличается от методологии моделирования отдельно взятых сложных явлений, размерность в которых – не главное: прежде всего тем, что в первом случае моделируется система из сравнительно простых элементов, каждый из которых модельеру хорошо известен.

Познание *сложного явления* на концептуальном уровне вызывает трудности именно в постижении одного элемента как единственного предмета исследования. Модельер стремится познать структуру сложного явления, и, если одиночное явление удастся представить в виде совокупности простых явлений, проблемы моделирования *одиночного сложного* становятся проблемами моделирования *сложного большого*. В этом случае нас может заинтересовать структура *сложного большого* и, следовательно, его структурная сложность.

Таким образом, познание сложного можно квалифицировать как единую процедуру получения знаний для многих (если не большинства) предметов исследования в самых разных кибернетических направлениях.

История развития теории сложности сопровождалась решением задач, близких по своей сущности к познанию сложного как большого, глобального. Постепенно зарождался интерес к рассмотрению систем большой размерности, развивались такие направления, как теория систем и ее приложения, системный анализ, теория структур. Этому в немалой степени способствовали такие прикладные отрасли знаний, как компьютерные сети и телекоммуникации, региональная экономика, мировая экономика и др.

В немалой степени на развитие общей теории сложности оказала влияние химическая кибернетика и, в частности, химические технологии, промышленная экология. Началом послужило то обстоятельство, что ограниченные возможности компьютеров прошлого столетия способствовали появлению задачи «оптимального разрыва рециклов». Рассматривались такие схемы соединения аппаратов, в которых кроме прямой передачи веществ от аппарата к аппарату существовали обратные, рециркулирующие потоки. Требовалось составить расчетный модуль, позволяющий осуществлять итерационный расчет схемы в целом, причем так, чтобы проблемы собственно вычислений на ЭВМ были успешно решены.

Задача оптимального разрыва рециклов стала актуальной задачей математического моделирования и оптимизации именно в то время, когда появились тенденции перехода от рассмотрения *частного* к рассмотрению *целого*, т.е. к понятию «система».

По мере развития химической кибернетики стало актуальным моделирование сложных химико-технологических схем (СХТС). Производство ацетиленов, например, включает более сотни аппаратов, соединенных материальными потоками.

Возникли новые для того времени задачи *математического моделирования* СХТС, а затем и глобальной оптимизации схемы как единого целого, состоящего из элементов с известными математическими моделями. Исследователям хотелось понять, каково поведение всей схемы в целом, если изменения произошли в одном из аппаратов, в некоторой части всей системы, в каждом из аппаратов и т.д. Более того,

необходимо было найти такие режимы функционирования сложных схем, при которых критерии глобальной оптимизации приобретали бы экстремальные значения.

Следует отметить, что большинство задач глобальной оптимизации в 80-90 годы прошлого столетия так и не были решены полностью из-за недостаточности вычислительных ресурсов того времени.

Задача оптимального разрыва рециклов – лишь одна из многочисленных задач теории декомпозиции больших систем. В рамках этого направления решалась следующая задача, связанная, по сути дела, с познанием сложного. СХТС представляется в виде ориентированного графа, в котором вершинами являются математические модели аппаратов; вес дуги назначается равным числу переменных, передаваемых из одной модели в другую; необходимо найти оптимальное итерируемое множество (ОИМ) – такое подмножество дуг графа, удаление которого приводит граф к дереву, а сумма весов дуг приобретает свое минимальное значение [6-8].

Если, предположим, задачу поиска ОИМ решить удалось, то это означает, что исходная система нелинейных уравнений (СНУ) большой размерности редуцируется в задачу меньшей размерности, сокращается вычислительная сложность и, на качественном уровне, упрощается процедура коррекции приближений по ходу осуществления итераций.

Разрабатывались специальные методы решения СНУ большой размерности. Из задач, приведенных в книгах Островского Г.М., можно видеть как системы, где изначально присутствовали десятки и даже сотни переменных, становились доступными для решения на ЭВМ 80-х годов. Это особенно важно для решения задач оптимизации СХТС и по сей день: когда СНУ большой размерности решается многократно, могут потребоваться мощности суперкомпьютеров.

Задачи, основанные на понятии «структурная сложность», можно поделить на два направления: *декомпозиция задач большой размерности* и *структурная композиция*. В первом классе задач ставятся цели анализа системы, разрабатывается аксиоматика сложности, находится критерий сложности, на основе которого проводится декомпозиция систем. Во втором классе задач необходимо сконструировать систему из некоторого набора типовых элементов таким образом, чтобы структурная сложность результата композиции не превышала наперед заданную величину.

В задачах декомпозиции происходит познание сложного, а в задачах композиции – конструирование сложного. Общим для них является необходимость процедуры оценки сложности.

7. Использование критериев оценки структурной сложности для решения задач в масштабах компьютерных сетей большой размерности

Компьютерные сети большой размерности, в частности, региональные образовательные компьютерные сети (РОКС) – удобный объект применения теории структурной сложности. Он позволяет осуществлять осмысление состояния РОКС как большой сложной системы, с последующей выработкой обоснованных решений по ее обслуживанию и планированию дорогостоящих мероприятий [1-3,22].

В постижении сложного важная роль отводится понятию «цель анализа». Именно она является первоосновой аксиом и определений, способствует формированию алгебры структурной сложности, благодаря чему формируются критерии количественной оценки сложности и оптимальные алгоритмы решения задач большой размерности на кластерной основе [18, 19, 24, 29].

Важнейшей особенностью РОКС является ее большая размерность, поведение таких систем с использованием традиционных подходов не поддается осмыслению и количественному анализу в силу ряда веских причин [23, 30]. Здесь важно отметить, что осмысление поведения технических систем невозможно без количественного анализа, а мерой информации при этом является не общее число статистических параметров, которые мы наблюдаем, а разность степеней неуверенности в случаях, когда мы располагаем и не располагаем знаниями. Таким образом, количественные характеристики работы РОКС могут быть неконструктивными знаниями, не способствующими приросту информации. Задача о приложении теории структурной сложности – устранить этот недостаток и переработать имеющиеся данные в конструктивные знания, благодаря которым можно решать насущные задачи.

В работах [25-28, 30, 31] формулируются основные задачи, основанные на концепциях теории структурной сложности, приводятся постановки задач и обсуждаются возможные пути их решения на базе ранее разработанных теоретических основ [4–10, 12, 13, 17].

Главные тенденции применения новых теоретических изысканий:

- развитие региональных телекоммуникационных инфраструктур сопровождается ростом числа поставщиков и потребителей информации, находящихся в едином информационном пространстве;

- объемы информации, передаваемой по компьютерным сетям, неуклонно увеличиваются за счет их модернизации, усиления мультимедийной составляющей и доли трафика реального времени;

- рост числа компьютеров, подключенных к провайдерам системы образования, очевиден и неизбежен – это связано, прежде всего, с ростом доходов потребителей информации;

- умножение трафика происходит по причинам постепенного преобразования сети Интернет в средство массовой информации: количество рекламы растет, по меньшей мере, пропорционально росту новых адресов;

- увеличивается вариативность информационного наполнения сетей, что порождает рост числа запросов в широкой аудитории пользователей с самыми разными интересами;

- в силу психологических причин часть запросов обладают той степенью новизны по отношению к ранее выдаваемым запросам, что при увеличении пропускной способности сети растет количество запросов без острой на то необходимости (случайных запросов);

- рост трафика и числа пользователей неизбежно приводит к необходимости реструктуризации потоков информации на уровне провайдеров, модернизации Web-технологий на серверном уровне; возникает немало научно-технических проблем (трудно решаемых задач), связанных с принятием решений по реконструкции существующих телекоммуникаций, реструктуризации потоков информации, модернизации Web-узлов;

- решения по реконструкции сетей предполагают использование нового оборудования, компенсирующего своими возможностями потребности увеличения пропускной способности информационных магистралей РОКС до уровня прогнозируемого трафика на значительный период будущей их эксплуатации.

Тенденции, перечисленные выше, усиливают потребность в разработке теоретических основ математического моделирования компьютерных сетей для

принятия обоснованных решений в масштабах информационного пространства региона.

Проблематика РОКС на уровне принятия решений иллюстрируется на рис. 1. Поясним пункты этой диаграммы, отмеченные утолщенными линиями.

Совершенно очевидно, что этапу принятия решений по реконструкции должен предшествовать этап анализ состояния сети. Анализ осложняется рядом факторов, которые подчас трудно формализовать или рационально трактовать, имея при этом, казалось бы, все необходимые статистические данные. С одной стороны, общий объем информации, хранящейся во фреймах знаний, накапливается (детализированные протоколы работы сети могут храниться, архивироваться), но, с другой стороны, чем этот объем больше, тем сложнее осмысливать результаты статистической обработки случайных изменений в структуре сети и осуществлять ее параметризацию.

Наиболее существенной характеристикой каналов связи в РОКС является их информационная загруженность. Анализ производительности серверов и линий связи является первоосновой оперативной параметризации элементов структуры сети, позволяет иметь новую информацию о производительности сети в целом и лишь на принципиальном уровне помогает эффективному управлению сетью, т.к. без глобального анализа сети как большой системы, можно с уверенностью делать прогнозы о развитии лишь отдельных каналов. Оперативный анализ трафика осложняется огромным количеством и разнородностью информации, циркулирующей в сети. Разнородность знаний о функционировании узлов сети и каналов передачи информации объясняется различиями в операционных системах, в контенте узлов и в излишне вариабельном характере трафика корпоративных клиентов РОКС. Таким образом, из-за большой размерности сетевого трафика при его статистическом анализе в условиях региона перед работниками РОКС возникает сложнейшая задача рациональной трактовки результатов: как переработать эту информацию в сравнительно небольшой набор показателей, чтобы они были представительными, доступными для понимания и дальнейшего принятия решений?

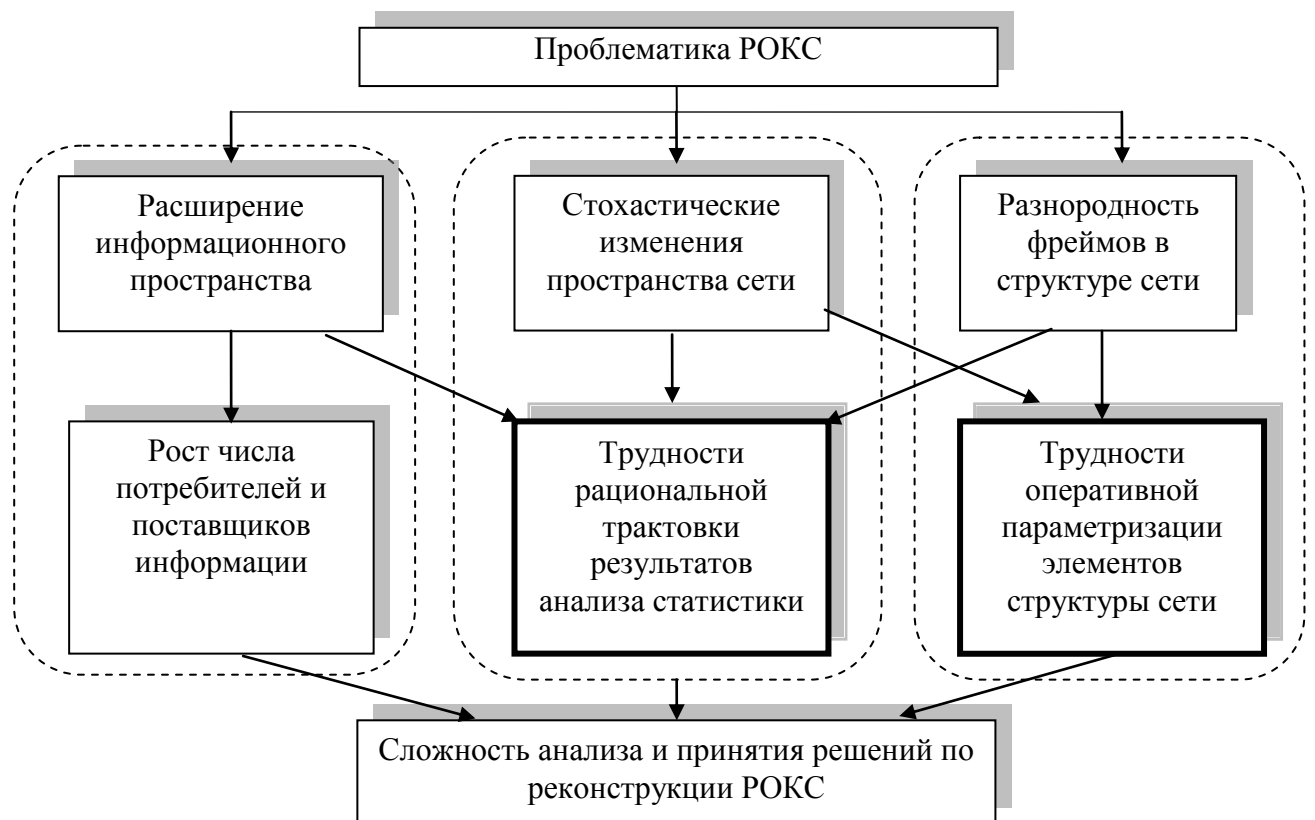


Рисунок 1 - Основные проблемы системного анализа РОКС

Существенную роль в непонимании особенностей РОКС как единого целого играют случайные факторы [27]. Можно выделить три основных формы стохастических изменений пространства региональной компьютерной сети:

- 1 изменение загрузки и пропускной способности линий связи на сравнительно коротких промежутках времени: суточные и недельные изменения;
- 2 внезапные и непредсказуемые изменения контента сети, когда из-за действия внешней информационной среды активность пользователей неожиданно то уменьшается, то вдруг резко возрастает;
- 3 внезапные казусы программного обеспечения на уровне серверов, которые изначально не готовы преодолевать все изменения сетевого пространства во всем их стохастическом разнообразии (зацикливание пакетов, ошибки маршрутизации и т.п.).

Вышеперечисленные стохастические изменения определяют насущную необходимость быстрого анализа сетевых ситуаций и выработки решений по перенаправлению потоков в целях своевременного устранения перегрузок.

Здесь нельзя не сказать, что, помимо кратковременных стохастических флуктуаций, могут иметь место трендовые изменения. Речь идет о постепенных изменениях пространства сети, суть которых порой непознаваема. Сказывается действие термодинамических аналогий: нарастание информационного хаоса приводит к регрессу, не поддающемуся управлению.

Вторая форма изменений время от времени неизбежно возвращает нас к необходимости проводить реконструкцию оборудования и контента РОКС, чтобы не привести сеть в состояние, когда ожидаемые улучшения переходят в ранг столь дорогих мероприятий, что они уже недоступны по финансовым соображениям.

Опыт работы ЦНИТ ТГТУ [1] как провайдера глобальных компьютерных сетей в г. Тамбове и Тамбовской области показывает, что на современном этапе развития сети Интернет в России выбор альтернатив по принятию крупномасштабных решений подчинен общим тенденциям максимального скачка – перехода на опережающие мощности компьютерного и сетевого оборудования [22, 23, 28]. Комплекс нового оборудования и соответствующего программного обеспечения должен на длительный период покрыть потребности в увеличении пропускной способности информационных магистралей – вплоть до максимально возможного трафика в конце планового периода эксплуатации.

Итак, становится совершенно очевидным, что решения по реконструкции РОКС связаны с приобретением дорогостоящего оборудования для покрытия возможного увеличения пропускной способности информационных магистралей до прогнозируемого уровня. При этом очевидна важность принятия научно обеспеченных решений, основанных на анализе существующего положения и экстраполяции будущего. Если к какому-то моменту времени региональная сеть перестает справляться с ростом потребления услуг, то можно усмотреть два возможных варианта развития этой ситуации:

1. нагрузка имеет пиковый характер, пройдет немного времени и РОКС снова вернется в «обычное» состояние (например, период сессии в вузах);

2. нагрузка возросла по причинам, которые невозможно компенсировать, нет возврата к «обычному» состоянию (например, к РОКС подключили новый корпус университета).

Оба варианта требуют выработки рационального решения. В первом случае реконструкция может быть необходима, если пики повышения нагрузки становятся причиной информационных катастроф.

Важно определить, что считается «информационной катастрофой» [20] – невозможность получить информацию одним пользователем или группой пользователей, в каком количестве, за какой период времени. Если время ожидания пользователем ответа сети эпизодически больше «обычного», то важно знать, насколько потери этого пользователя велики для него и, с другой стороны, сколь велики последствия этих потерь для всех остальных членов общества. Здесь можно привести два контрастных примера:

1. студент ждет ответа сети больше «обычного» времени, в результате, его личное время пользования сетью, предположим, удваивается; подобные казусы могут иметь как эпизодический, так и общий характер в масштабах ВУЗа, в последнем случае налицо информационная катастрофа;
2. проводится дорогостоящий эксперимент с удаленным доступом по сети, и в это время происходит сбой из-за перегрузки сети; такая ситуация может оказаться недопустима даже в единичном случае (пример – сбой при проведении сеанса телемедицины).

Актуальной задачей является обеспечение качественного обслуживания трафика, что особенно необходимо при наметившемся сейчас переходе на новый стандарт IPv6, среди новых возможностей которого – возможность управления потоками данных на уровне дополнительной информации в информационных пакетах, циркулирующих по сети.

Загрузка и пропускная способность линий связи РОКС меняются динамически, и возникает необходимость быстрого анализа сетевых ситуаций и выработки решений по перенаправлению потоков для устранения перегрузок, для повышения равномерности распределения информационной массы по каналам. В этой связи разрабатываются, в частности, новые методы адаптации протоколов маршрутизации в сети. Необходимы

математический аппарат и комплексы программ, позволяющие оценивать эффективность функционирования линий связи и вырабатывать решения по выбору маршрутов. К сожалению, разработка программного обеспечения такого рода «под ключ» требует огромных затрат и, подчас, невозможна в вузах.

Суммируя вышесказанное, появляются две основные задачи, которые необходимо решать на уровне РОКС. Они весьма актуальны. На рис. 2 показаны главные тенденции к постановке этих задач, а именно показано, что двухзадачный комплекс подразумевает взаимодействие задач на уровне их взаимопроникновения [23, 30].

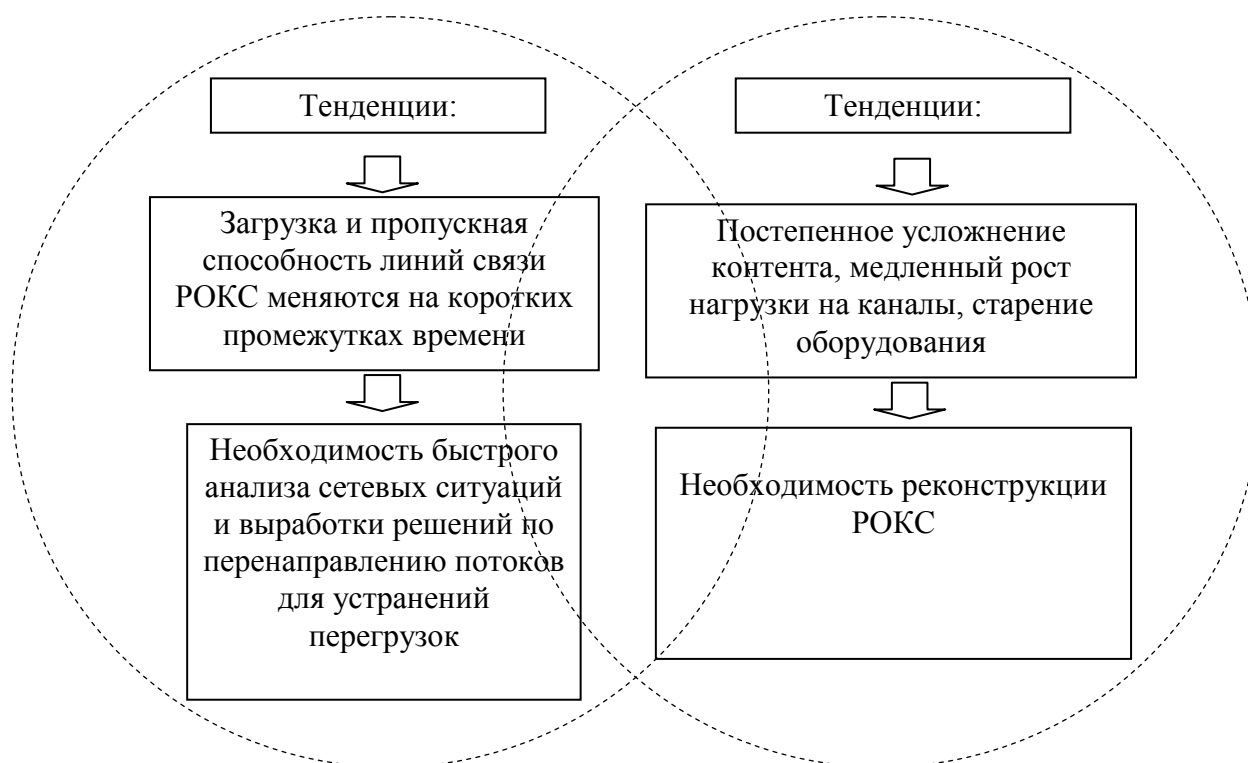


Рисунок 2 - Основные тенденции решения проблем системного анализа РОКС

Оптимизация современных компьютерных сетей, по сравнению с состоянием данного вопроса в предметной области [14] знаний примерно 10-15 лет тому назад, в настоящее время претерпевает значительные изменения. Прежде всего, произошло постепенное устаревание некоторых критериев оптимизации – они перестали быть

актуальными. Так, например, сейчас менее актуальны критерии, связанные с понятием «надежность в малом».

В образовательных сетях, в отличие, например, от военно-космических сфер, вопросы надежности в малом (на уровне прохождения отдельно взятого пакета) уже давно решены заменой старого компьютерного оборудования современными быстродействующими компьютерами и средствами связи. Становятся понятными иные масштабы рассмотрения проблем – проблемы математического моделирования перерастают в проблемы системного анализа, которые, в свою очередь, трансформируются в важные и актуальные проблемы структурного анализа, основанные на рассмотрении аспектов оценки структурной сложности больших технических систем.

Список использованных источников

1. Подольский, В.Е. Создание инфраструктуры системы открытого образования / В.Е. Подольский // Информатика и образование. - 2001. - № 4. - С. 11 – 18.
2. Васенин, В.А. Высокопроизводительные научно-образовательные сети России. Настоящее и будущее / В.А. Васенин; Моск.гос.ун-т. - М., 1999. - 32 с.
3. Подольский, В.Е. Анализ состояния и перспектив развития Тамбовской областной науч.-образоват. информац. сети / В.Е. Подольский // Вестник ТГТУ. - 2003. - Т. 9, № 2. - С. 166 - 176.
4. Толстых, Т.Н. Структурный анализ в региональной экономике / Т.Н. Толстых, С.С. Толстых. - Воронеж: Истоки, 1998. - 68 с.
5. Николис, Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. - М.: Мир, 1990. - 343 с.
6. Островский, Г.М. Оптимизация сложных химико–технологических схем / Г.М. Островский. - М.: Химия, 1975. - 380 с.
7. Островский, Г.М. Декомпозиция сложных химико–технологических схем / Г.М. Островский. - М.: Химия, 1980. - 289 с.
8. Бодров, В.И. Оптимизация природоохранных мероприятий в регионе / В.И. Бодров, Н.С. Попов, С.С. Толстых // ТОХТ. - 1990. - Т. 19. - С. 1120 - 1131.
9. Толстых, С.С. Матричный критерий структурной сложности замкнутых систем / С.С. Толстых // Вестник ТГТУ. - 1998. - Т.4, № 2–3. - С. 238 - 244.
10. Сэвидж, Дж. Э. Сложность вычислений / Дж. Э. Сэвидж. - М.: Факториал, 1998. - 368 с.
11. Хэссард, Б. Теория и приложения бифуркации рождения цикла / Б. Хэссард, Н. Казаринов, И. Вэн. - М.: Мир, 1985. - 280 с.
12. Толстых, С.С. Эвристический алгоритм построения функций структурной сложности / С.С. Толстых, Т.Н. Толстых // Вестник ТГТУ. - 1996. - Т.1, № 1–2. - С. 39 - 45.

13. Толстых, С.С. Разработка алгоритмического и программного обеспечения вычисления рекурсивных функций структурной сложности / С.С. Толстых, А.Г. Клещев // Труды ТГТУ. - 1999. - Т. 4, № 2–3. - С. 135 - 138.
14. Бергаланфи, Л. фон. Общая теория систем - критический обзор / Л. фон. Бергаланфи // Исследования по общей теории систем. - М.: Прогресс, 1969. - С. 23 - 82.
15. Биркгоф, Г. Теория структур / Г. Биркгоф. - М.: Мир, 1982. - 302 с.
16. Гленсдорф, П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин. - М.: Мир, 1973. - 280 с.
17. Ханзель, К. Методы структурного анализа в задачах исследования химико-технологических схем / К. Ханзель, Ю.М. Волин, Г.М. Островский; НИИТЭХИМ. - М., 1980. - Вып. 4 (89). - 60 с.
18. Попов, Н.С. Алгоритм структурной декомпозиции больших систем / Н.С. Попов, В.И. Бодров, С.С. Толстых. - М., 1985. - 45 с. - Деп. в ВИНТИ 12.01.1986. № 781-86Деп.
19. Толстых, С.С. Метод структурного анализа больших систем / С.С. Толстых, А.Г. Чаузов. - М., 1985. - 36 с. - Деп. в ВИНТИ 09.09.1985. № 6581-85.
20. Трауб, Дж. Информация, неопределённость, сложность / Дж. Трауб, Г. Васильковский, Х. Вожьянковский. - М.: Мир, 1988. - 184 с.
21. Теория сложности вычислений. Записки научных семинаров ЛОМИ. - Л.: Наука, 1991. - 177 с.
22. Особенности математического моделирования современных компьютерных сетей в образовательной сфере / А.Н. Тихонов, С.В. Мищенко, В.Е. Подольский, С.С. Толстых // Телематика-2003. – СПб., 2004. - Т.1. - С.78-79.
23. Подольский, В.Е. Структурная оптимизация региональной образовательной компьютерной сети / В.Е. Подольский, С.С. Толстых // Информационные технологии в науке, технике и образовании: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. - Аланья-Севастополь, 2004. - Т.1. - С.56 - 58.

24. Подольский, В.Е. Оптимизация кластерных вычислений с использованием критериев структурной сложности / В.Е. Подольский, С.С. Толстых // Вторая Сибирская школа-семинар по параллельным вычислениям. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. - С. 45 - 50.
25. Подольский, В.Е. Оценка эффективности функционирования региональной образовательной компьютерной сети на основе критериев структурной сложности / В.Е. Подольский, С.С. Толстых // КБД-ИНФО-2004: сб. тр. науч.-практ. конф. - Сочи, 2004. - С.159.
26. Подольский, В.Е. Использование критериев структурной сложности для имитационного моделирования региональных компьютерных сетей / В.Е. Подольский, С.С. Толстых // Параллельные вычисления в задачах математической физики: сб. ст. – Ростов: Изд-во РГУ, 2005. - С.67-75.
27. Podolskiy, V.E. The use of stochastic structural complexity criteria for acceptance of decisions on reconstruction of a regional educational computer network / V.E. Podolskiy // Information technologies in Education and Scientific research: materials of the international scientific conference. - Ege University, 2005. - P. 234-237.
28. Подольский, В.Е. Неполные системы сочетаний мероприятий в задачах повышения качества обслуживания региональных образовательных компьютерных сетей / В.Е. Подольский, С.С. Толстых // КБД-ИНФО-2005: сб. тр. науч.-практ. конф. - Сочи, 2005. - С. 334 - 336.
29. Подольский, В.Е. Распределенные вычисления в оценке структурной сложности региональной образовательной компьютерной сети / В.Е. Подольский, С.С. Толстых, Р.В. Лопунов // ИНФО-2006: материалы науч.-практ. конф. - Сочи, 2006. - С. 296 - 298.
30. Мищенко, С.В. Разработка теоретических основ развития региональных образовательных компьютерных сетей на базе анализа структурной сложности / С.В.Мищенко, В.Е.Подольский, С.С.Толстых // Инженерное образование: Электронный журнал. - <http://www.techno.edu.ru:16001/db/msg/30384.html>.
31. Подольский, В.Е. Повышение эффективности региональных образовательных компьютерных сетей с использованием элементов структурного анализа и

теории сложности / В.Е. Подольский, С.С. Толстых.
- М: Машиностроение, 2006. - 176 с.

32. Майков, В.П. Энтропийные методы моделирования технологических процессов – М.: Изд-во МИХМ, 1982. – 88 с.
33. Солодовников, В.В. Принцип сложности в теории управления (о проектировании оптимальных систем и проблеме корректности) / Бирюков В.Ф., Тумаркин В.И. - М.: Наука, 1977. – 344 с.
34. Солодовников, В.В. Теория сложности и проектирование систем управления. (Теория и методы системного анализа) / Тумаркин В.И. - М. Наука, 1990. - 168 с.