Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет, Украина
Институт проблем информатики Российской академии наук,
Российская Федерация

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИНФОРМАТИКИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Материалы
международного семинара
23-26 сентября 2012 г., г. Севастополь

Севастополь - 2012

УДК 004

Современные проблемы прикладной математики, информатики, автоматизации, управления // Материалы международного семинара. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 136 с.

В сборнике представлены материалы докладов научно-технического семинара «Современные проблемы прикладной математики, информатики, автоматизации, управления».
В докладах изложены перспективные формы и методы решения актуальных задач прикладной математики, информатики, автоматизации и управления.
Материалы публикуются в авторской редакции.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прикладная математика, информатика, автоматизация, управление – важнейшие области современной науки, охватывающие практически все направления человеческой деятельности, прежде всего, исследования, а также проектирование, производство, эксплуатацию,… Поэтому, издание настоящего сборника представляется весьма своевременным и важным.

В работе Урсула А.Д. «Всеобщий характер информации» приведены информационные основы современной науки. Колин К.К. в работе «Изучение информации – актуальная задача инновационного развития современного общества» подтверждает необходимость для всех первоочередного изучения информации. Панов А.Д. в работе «Природа математики и структура реальности. Объективность мира математических форм» показывает объективность используемой всеми и всюду математики. Работа Скаткова А.В. (совместно с Ворониным Д.Ю.) «Методы поддержки принятия решений в критических инфраструктурах» особенно актуальна в наше время, когда незначительные сбои могут привезти к авариям в большинстве случаев носящих характер катастроф. Работы Синицына И.Н. **«**Развитие методов аналитического моделирования распределений с инвариантной мерой в стохастических системах», Филимонова Н.Б. «Мифологизация вероятностно-статистической методологии учета факторов неопределенности в задачах управления и наблюдения» является идеальными примерами применения классического подхода к современным научным исследованиям.

Работы Гуревича И.М. посвящены оценкам информационных характеристик физических, химических (совместно с Павловым В.Н.) и биологических систем (совместно с Евтигнеевым М.П.). К данному направлению относится и работа Сейфуль-Мулюкова Р.Б. «Теория информатики и приложения её законов для познания сложных природных систем». В работе Леонтовича А.Л (совместно с Евтигнеевым М.П.) «Сцеплённые состояния» и релятивистский закон всемирного тяготения» рассмотрено применения понятия «сцеплённых состояний» к выводу формулы релятивистского закона всемирного тяготения.

Работы Кирюхина В.В. «Параметрический синтез кластера высокой производительности на базе стохастической сетевой модели», Обжерина Ю.Е. (совместно с Бойко Е.Г.**)** «Полумарковская модель двухкомпонентной производственной системы с применением алгоритмов фазового укрупнения», Краснодубца Л. А. (совместно с. Балакановым Э.О.) «Конструирование структуры информационных каналов в системах управления с обратной связью на основе энергетических критериев» посвящены оптимизации сложных технических систем. В работе Фархадова М.П. (совместно с Петуховой Н.В. и Абраменковым А.Н.) «Речевой интерфейс для доступа к объектам электронной карты города» предложены решения, повышающие эффективность оперативного наблюдения за ситуациями с целью обеспечения безопасности города и быстрого реагирования на чрезвычайные ситуации.

Настоящий сборник будет полезен студентам, аспирантам и специалистам, ученым России, Украины и других стран, получающим образование и работающим в различных областях современной науки и техники.

И.А. Соколов,
академик РАН, профессор.

УДК 681.32
А.Д. Урсул, д-р филос. наук, профессор,
академик АН Молдавии, заслуженный деятель науки РФ
Центр исследований глобальных процессов и устойчивого развития
Российского торгово-экономического университета, г. Москва, Россия
ursul-ad@mail.ru

ВСЕОБЩИЙ ХАРАКТЕР ИНФОРМАЦИИ

Проблема информации, которая возникла немногим более полувека тому назад, стала не только междисциплинарной и общенаучной, но уже глобальной и даже космологической проблемой, о чем свидетельствуют синергетика, современная физика, астрономия и другие науки о космосе. И не случайно в последнее время даже в философии появился своего рода «ренессансный» интерес к этой проблеме [1]. Прежде всего, это весьма широкое понимание информации, которое дает основание считать наиболее общую науку об информации – информатику одной из самых фундаментальных отраслей знания, приближающейся по «степени фундаментальности» к физике, химии и биологии. Вместе с тем, расширение и фундаментализация категориального статуса информации, недавно полученные результаты, позволяют по-новому рассматривать ряд проблем, в том числе касающихся природы информации.

Нельзя смириться с положением, когда за отдельными – пусть даже удачными — исследованиями фрагментов теряется целостная картина проблемы информации и перспективы ее развития. Наряду с дальнейшей более углубленной разработкой узких тем в проблеме информации возникает необходимость создания целостного или во всяком случае более широкого взгляда на проблему информации, который учитывал бы как единство, так и многообразие проявлений феномена информации.

Один из подходов к исследованию феномена информации – признание всеобщности информации представляется наиболее плодотворным. В самом общем виде предполагается, что информация, также как и энергия, существует во всех сферах и фрагментах мироздания, является характеристикой всех материальных систем. При таком подходе при рассмотрении взаимодействия материальных объектов (систем) между ними происходит обмен не только веществом и энергией, но и информацией. Точки зрения о том, что информация присуща лишь биологической или даже социальной ступени эволюции, не стоит считать ошибочными – это просто иной способ видения мира и мышления, который связывает информацию либо с управлением, либо только с сознанием. Пока эти подходы конкурируют, но все же методологически более эффективной оказывается атрибутивная концепция, признающая всеобщность информации, на которой строится не только информатика и философия информации, но фактически и синергетика, а через нее – и науки о неживой природе [2-9].

Во-первых, информация связана с разнообразием, различием, во-вторых, с отражением. Информация, на наш взгляд, выражает такую характеристику процессов и объектов как разнообразие, неоднородность распределения материи в пространстве и времени, неравномерности протекания процессов взаимодействия на всех уровнях движения и эволюции в мироздании. Но информация также характеризует и отражение. Под отражением, в самом широком смысле, обычно понимают определенный аспект взаимодействия (воздействия) двух (или нескольких) объектов. Этот аспект выражается в том, что из всего содержания взаимодействия выделяется лишь то, что в одной системе появляется в результате воздействия другой системы и соответствует (тождественно, изо- или гомоморфно) этой последней.

В понятии отражения наиболее существенными являются два признака, во-первых, взаимодействие, во-вторых, определенное тождество систем, появляющееся в результате взаимодействия. В силу наличия этих признаков, отражение отличается и от взаимодействия, и от того или иного типа тождества. Отражение отличается от взаимодействия, поскольку здесь выделяется лишь аспект тождества отражаемого и отражающего. Однако свойство отражения характеризует процессы взаимодействия в настоящем или же в прошлом, но для будущего оно принимает особенные формы,

В соответствии с этим понятие информации можно определить в самом общем случае как отраженное разнообразие. Информация – это разнообразие, которое один объект содержит о другом объекте (в процессе их взаимодействия). Может показаться, что такое определение противоречит пониманию информации как разнообразия, которое материальный объект содержит в самом себе. Но информация может рассматриваться и как разнообразие, которое является как бы результатом отражения объектом самого себя, то есть самоотражения. Отражение, основанное на взаимодействии, имеет смысл назвать взаимоотражением. В качестве отражаемой и отражающей здесь выступают обе взаимодействующие системы. Взаимодействие можно рассматривать и как взаимодействие элементов, частей внутри объекта. Отражение, связанное с такого рода внутренними взаимодействиями, может быть охарактеризовано как самоотражение, то есть отражение объектом (системой) самого себя.

Равным образом, скажем, формула Шеннона (абсолютного количества информации) может быть представлена как частный случай формулы относительного (взаимного) количества информации, когда оно рассматривается как содержащееся в объекте относительно самого себя.

На основе приведенного определения можно считать, что информация выражает свойство материи, которое является всеобщим. Ведь и разнообразие, и отражение – всеобщие свойства, атрибуты материи.

Понятие информации отражает как объективно-реальное, не зависящее от субъекта свойство объектов неживой и живой природы, общества, так и свойства познания, мышления. Разнообразие объективной реальности отражается сознанием человека, и в этом смысле оно становится отраженным разнообразием, свойством сознания. Информация, таким образом, присуща как материальному, так и идеальному. Она применима и к характеристике материи, и к характеристике сознания. Если объективная (и потенциальная для субъекта) информация может считаться свойством материи, то идеальная, субъективная информация есть отражение объективной, материальной информации.

Основы более широкого подхода к определению понятия информации мы находим в работах одного из основоположников кибернетики – английского ученого У. Росс Эшби (прежде всего в книге «Введение в кибернетику») [10-11]. Согласно Эшби, понятие информации неотделимо от понятия разнообразия. Другими словами, природа информации заключается в разнообразии, а количество информации выражает количество разнообразия. По Эшби, множество с разнообразием и множество с вероятностями имеют эквивалентные свойства. Как он отмечает, закон необходимого разнообразия является обобщением 10-й теоремы Шеннона на процессы управления.

Можно также отметить, что концепция информации как разнообразия не противоречит и общежитейскому пониманию информации как сведений, которыми обмениваются люди. Ведь сведения тогда представляют интерес, несут с собой информацию, когда мы узнаем что-то новое, отличное от известного. Поэтому с точки зрения теории обмена информацией между людьми сведения, которые не раскрывают индивидууму чего-либо ему не известного, могут считаться не содержащими информации.

В ряде работ советского биолога И.И. Шмальгаузена информация рассматривается как многообразие. Применительно к биологическим системам он пишет об «определении количества информации как меры многообразия в строении популяции» [12].

В.М. Глушков характеризует информацию «как меру неоднородности в распределении энергии (или вещества) в пространстве и во времени» [13]. Информация, по его мнению, существует постольку, поскольку существуют сами материальные тела и, следовательно, созданные ими неоднородности. Всякая неоднородность несет с собой какую-то информацию.

Информация не существует без отражения, но она невозможна и без других атрибутов материи – движения, пространства, времени и т. д.

Таким образом, в самом широком смысле информация с позиций теории отражения может быть представлена как отраженное разнообразие, а именно разнообразие, которое один объект содержит о другом объекте.

Именно эта формула

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p(A_i)\log_2 p(A_i),$$

предложенная в 1948 году американским математиком и инженером К. Шенноном [14], в настоящее время не уступает в известности эйнштейновской формуле $E = mc^2$. Если в результате опыта уничтожается выражаемая формулой Шеннона неопределенность, то количество информации оказывается равным степени уничтоженной неопределенности. Формулу Шеннона называют еще формулой негэнтропии, поскольку она с отрицательным знаком аналогична формуле энтропии в ее статистической интерпретации, данной Больцманом [5, 15-16].

Вскоре после работ К. Шеннона появились попытки оценить количество информации в живых организмах. Отметим, что на молекулярном уровне в соответствии с вероятностной теорией информации одноклеточный организм содержит не менее 10^3, а может быть, даже 10^{13} битов [17]. Это количество информации, по Кастлеру, выражает в двоичных единицах число молекулярных конфигураций, совместимых с жизнью.

Существуют и другие невероятностные подходы к определению информации, например динамический и топологический.

Основанием для применения теории информации к динамическим системам послужили некоторые аналогии динамических систем с так называемым свойством «перемешивания» и случайными процессами. В результате работ А.Н. Колмогорова [18-19] и других ученых эти аналогии были значительно углублены, и удалось получить целый ряд интересных результатов благодаря использованию понятия негэнтропии. Так, несмотря на то, что статистические системы многозначно, а динамические системы однозначно детерминированы, некоторые свойства последних могут быть охарактеризованы количеством информации. Это значит, что понятие информации не связано со спецификой статистических закономерностей, а отражает определенное свойство, общее для статистических и динамических систем.

В 1955 году американский математик, биолог и социолог Н. Рашевский [20], исходя из соображений теоретической биологии, ввел новое определение количества информации, которое было названо им топологическим. Важно подчеркнуть, что мерой топологического количества информации, как и статистического, является Шенноновская информационная энтропия. Топологическая информация оценивается на состояниях (определяемых как число вершин заданной степени), отражающих топологию графа, который описывает структуру молекулы.

Наконец, последний подход к определению количества информации был предложен в 1965 году А. Н. Колмогоровым [18]. Алгоритмическое количество информации, отмечает А.Н. Колмогоров, является как бы минимальной длиной программы, которая при заданном А (алгоритме) позволяет получить В (последовательность).

Информация имеет еще и качественный аспект, к изучению которого уже приступила современная наука. Все материальные системы в какой-то степени можно рассматривать как некоторые множества, закодированные на своем «языке» при помощи некоторого конечного числа «букв». Именно такой подход мы встречаем в работах Н.М. Амосова, который также связывает понятие кода с качеством информации. На атомном уровне код состоит из элементарных частиц, на молекулярном уровне – из атомов и т. д. В связи с этим Н.М. Амосовым [21] интересно ставится проблема состава и взаимоотношения высших и низших кодов. Большая белковая молекула, считает этот автор, может получать информацию, переданную низшими кодами – элементарными частицами, отдельными атомами. Но высший код для нее – молекулярный. Если на нее воздействовать, скажем, словом, она «не поймет», так как ее «качество», ее структура не в состоянии воспринимать этот «слишком высокий» код. Итак, строение, структура, система тесно связаны с кодом передаваемой и воспринимаемой информации. Поэтому можно сказать, что код определяет качество.

Именно в связи с появлением различных концепций и теорий информации возник вопрос: нельзя ли дать наиболее общее определение понятия информации, которое не противоречило бы ни одной из существующих теорий и ее приложениям, вытекало бы из логики развития самого понятия информации и явилось бы конечным результатом этого развития?

Было также обращено внимание на весьма плодотворные попытки применения теории информации в науках о неживой природе, в частности в физике и химии. Уместно здесь привести мнение ученых, начавших работать в области применения теории информации в физике. Так, Д.С. Лебедев и Л.В. Левитин [22] писали: «Еще Л. Больцман и позднее Л. Сцилард придавали термодинамическому понятию энтропии информационный смысл. Однако теория информации, начиная с основополагающих работ К. Шеннона, развивалась вначале как чисто математическая дисциплина. Создавалось впечатление, что закономерности передачи и переработки информации не являются физическими и понятия теории информации не могут быть определены на основе физических понятий. Но лишь в классических работах Л. Бриллюэна [5, 15-16] был сформулирован в общем виде негэнтропийный принцип информации и установлена глубокая связь между физической энтропией и информацией».

Информационное изложение физики, по-видимому, обладает определенными методологическими достоинствами, поскольку позволяет с единой точки зрения охватить многие физические теории. Новая схема изложения фундаментальных физических теорий исходит, конечно, из того, что информация и ее количество являются объективной характеристикой физических явлений.

Попытки применения теории информации для описания физических процессов свидетельствуют о недостаточности здесь энергетических методов. Думается, что нет необходимости игнорировать применение понятия информации и связанных с ним методов в науках о неживой природе, основываясь лишь на иллюзии достаточности «чисто энергетического описания». Ведь не исключено, что широкое использование понятия информации, скажем, в физике, и есть та «сумасшедшая» идея, о которой столь много в последнее время говорят и которая может привести к существенному прогрессу в физике элементарных частиц (или в космологии?) [23-24].

Применение методов теории информации в науках о неживой природе отнюдь не сводится лишь к тривиальному переводу на «модный» язык. Использование теоретико-информационных методов, оказывается, приводит к новым результатам, причем, методы эти несут более общую методологическую функцию, чем специальные методы наук о неживой природе, применявшиеся до теории информации. Эта более широкая общность информационных приемов позволяет подойти к исследованию и новых свойств систем неживой природы, которые «не под силу» традиционным методам.

Методы теории информации находят все более широкое применение и в комплексе наук о Земле. Исходя из философских положений о существенной связи информации с отражением и дифференциацией систем, А.Ф. Вольфсон [25] вводит понятие геохимической информации. Он полагает, что разделение минералов при рудообразовании можно представить как информационный процесс, идущий с уменьшением энтропии. Причем здесь оказываются уместными многие понятия теории передачи информации. При помощи методов теории информации в физику, химию, геологию и другие науки о неживой природе входит структурно-системный анализ, удается оценить степень сложности, упорядоченности, организации соответствующих систем неживой природы.

В настоящее время информационные методы для исследования физических и химических систем обосновываются, разрабатываются и используются зарубежными и российскими учеными. Важную роль в доказательстве всеобщего характера информации играют такие новые направления научного поиска как инфорационная физика и физическая теория информации. Наиболее интересные результаты в этой области, полученные И.М. Гуревичем, раскрывают широкие возможности информационного подхода и законов информатики при исследовании физических систем и Вселенной в целом [8,9.24,26]. Этим автором показано, что физические системы наряду с физическими характеристиками (массой, энергией, зарядом, и т.д.) имеют информационные характеристики – информационная энтропия по Шеннону, информационная дивергенция, совместная информационная энтропия, информация связи, дифференциальная информационная емкость и др.

И.М. Гуревич предполагает, что в начальные моменты времени существования Вселенной действовали информационные законы, причем эти законы содержались в начальных неоднородностях Вселенной. При этом информационные законы (законы информатики) определяют и ограничивают физические законы и свойства физических систем, в частности, законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, заряда. Им также разработана методика и получены оценки информационных характеристик физических систем, в том числе объема информации в фундаментальных и элементарных частицах, атомах, молекулах, органических соединениях, приведены оценки объема информации в космологических объектах (звездах, черных дырах, галактиках, Вселенной).

Атрибутивная концепция информации позволяет решить некоторые проблемы, по которым идут многолетние дискуссии ученых, например, о происхождении нефти. Так, использование информационного подхода позволило обосновать модель неорганического, глубинного происхождения нефти [27] и, в то же показало противоречивость схемы органического синтеза объективно существующим законам информатики. На базе этих исследований можно считать, что формирование всей совокупности углеводородных последовательностей происходит и в настоящее время в литосфере. Это дает основание полагать более адекватной ювенильную модель происхождения нефти, не только объясняющую неорганический генезис углеводородных последовательностей, но и представляющую некоторые закономерности распределения нефтеносности в недрах планеты и вытекающие из них направления поисков её промышленных запасов.

Выявление специфики информации в неживой природе возможно лишь по отношению к более высоким видам информации, т. е. по отношению к информации в биологических и социальных системах. Прежде всего, на что следует обратить внимание, – это отсутствие использования информации неживыми естественными системами. Информация этими системами в процессе взаимодействия с окружающей средой не выделяется от остальных свойств и атрибутов материи. В системах неживой природы все свойства и атрибуты «слиты» воедино, они не выделены из взаимодействия. В неживых системах нет отделов, частей, которые специализировались бы преимущественно на восприятии, переработке информации. На это совершенно справедливо обратил внимание А.Д. Арманд [28]. Он отмечает, что в отличие от высокоорганизованных информационных систем, природные комплексы не имеют четко дифференцированных «входов», «каналов связи», «выходов» и т. д.

Использование информации выступает как бы синонимом управления, но именно процессы управления отсутствуют в неживой природе. Здесь есть лишь элементы, зачатки процессов, которые при соответствующей организации, довольно высоком уровне накопления структурной информации превращаются в процессы управления. Неживые системы одинаково «равнодушны», безразличны и к информации, и к энергии, и к массе и к любым другим свойствам материи.

Количество информации характеризует не величину энергии, но и, как говорит В.М. Глушков, меру неоднородности в распределении энергии в пространстве и времени. «Информация, – подчеркивает В.М. Глушков, – существует постольку, поскольку существуют сами материальные тела и, следовательно, созданные ими неоднородности Всякая неоднородность несет с собою информацию» [13]. Из сказанного вытекает несводимость методов исследования в науках о неживой природе к одним лишь традиционным методам.

При помощи понятия информации в науки о неживой природе все больше проникает идея о всеобщности отражения. И нет ничего удивительного, что отражение изучается через иное, но близкое к нему понятие информации, – ведь большинство естественных наук уже привыкло иметь дело с измерениями, с приложением математических методов, среди которых наиболее адекватным для 'изучения процессов отражения оказался теоретико-информационный подход. Его применение диктуется отнюдь не удобством описания, а объективными обстоятельствами – именно независимо от сознания существующей сложностью неживых систем и наличием в них процессов отражения, развития. Эволюция неживой природы отнюдь не шла по пути увеличения энергии в соответствующих системах, а именно по пути увеличения внутреннего разнообразия систем. Возникновение управления связано с накоплением разнообразия, но не с накоплением энергии (хотя такую связь также нельзя отрицать) Важнейший закон управления – закон необходимого разнообразия (У.Р. Эшби [10]) формулируется именно через понятие разнообразия, но не энергии (так же как не через категории пространства, времени, массы и т. д.), хотя никто не станет отрицать, что управление невозможно без использования энергии (а также массы, времени и т. д.).

В системах неживой природы не было специального информационного отдела, специального выделения информационных функций, аспектов от всех остальных, то иная картина в живой природе. Если взять одноклеточные организмы и даже неклеточные формы жизни типа вирусов, то здесь информационные процессы связаны в основном с ДНК и РНК, т. е. из всех химических веществ лишь они оказались выделенными для «несения» именно информационной «нагрузки». В мире неживых систем таких специальных «информационных» веществ нет [29].

Если в одноклеточных (и внеклеточных) организмах информационная роль принадлежит особым молекулам – нуклеиновым кислотам, то в многоклеточных организмах эту же роль играют специализированные клетки, которые перерабатывают информацию. Здесь, наряду с нервными клетками, существует еще одна система, связанная с управлением, – эндокринная.

В информационных биологических процессах впервые возникает свойство кодирования информации, что характерно уже для простейших форм отражения в живой природе. Кодирование связано с отображением структуры одной системы в другой, с наличием соответствия между отражаемым и отражающими множествами, но такого соответствия, которое, например, в случае раздражимости, отвлекается от физико-химической природы отображаемой системы.

Теоретико-информационный подход к изменению степени сложности, упорядоченности и организации систем оказывается универсальным, если исходить из весьма общего понимания информации в плане разнообразия, а само разнообразие не понимать упрощенно, скажем, лишь как разнообразие элементов, но и как разнообразие связей, отношений, свойств и т. д. Универсальность теоретико-информационных средств проявляется, в частности, в том, что они позволяют измерять степень сложности, упорядоченности, организации всех объектов неживой, живой природы, общества, мышления (познания).

И все же возникают проблемы с дальнейшими доказательствами всеобщности информации, в связи с чем будет уместно рассмотреть этот вопрос, который на этот раз «задала» новейшая космология. Дело в том, что немногим более десяти лет тому назад астрофизики и космологи открыли так называемую «темную энергию» с самой большой плотностью энергии и отрицательным давлением. Утверждается, что в этом самом большом фрагменте нашей Вселенной (его большинство ученых именуют космическим вакуумом), который занимает около 74% плотности энергии мироздания, нет движения, изменения, различия, неоднородностей, по крайней мере, по представлениям космологов. На «темную энергию» как космический вакуум, ничто не воздействует – ни вещественный фрагмент Вселенной, занимающий немногим более 4% всей мировой плотности энергии, ни «темная масса» (скрытое вещество), составляющая, соответственно, почти четверть этого содержания. Между тем, нарушая закон Ньютона (действие равно противодействию) космический вакуум воздействует на все другие фрагменты Вселенной, заставляя их расширяться, причем с ускорением.

Поскольку в темной энергии нет разнообразия, то И.М. Гуревич, который серьезно занимается этой проблемой, высказал мнение, что там нет и информации [26]. Следует согласиться с тем, что в космическом вакууме, возможно, нет структурной информации (или, скорее всего, она содержится там в минимальном количестве), но есть информация именно как «связанная информация» целостных характеристик и некоторых свойств темной энергии как до недавнего времени неизвестного феномена.

Появление знания о каком-то материальном объекте уже указывает на то, что он содержит информацию внутри себя (если он обладает какой-то структурой или иной формой внутреннего разнообразия) или же только во «внешнем контуре» материального образования как некоторой ранее неизвестной целостности (если нет внутреннего разнообразия), которая каким-то образом достигает познающего субъекта. Темная энергия обнаружена потому, что она как некоторая целостность воздействует на остальные формы материи и конкретные материальные объекты, тем самым участвуя в отражательно-информационных процессах. А это означает, что космический вакуум, хотя и не содержит внутренне-структурной информации, но как целостное материальное образование, отличающееся от всех других фрагментов Вселенной, все же обладает каким-то минимальным количеством информации (ведь нам известны его характерные свойства – плотность энергии и отрицательное давление, вызывающее антигравитацию). Эта минимальная информация тем самым как бы содержится во «внешнем контуре» космического вакуума, т.е. как темного антигравитирующего фрагмента Вселенной, целостность которого понимается не как «отгороженность» от других форм (фрагментов) мироздания (видимого вещественного фрагмента Вселенной и ее скрытого вещества в форме гравитирующих темных масс), а как совокупное воздействие на них со стороны темной энергии (ускоренное разбегание галактик).

Космический вакуум однороден и лишен какой-либо структуры, каких-либо составляющих, а значит и разнообразия, информация (как структурная информация) должна отсутствовать. Но, с другой стороны, темная энергия как нечто целостное, но лишенное своих частей, обладает определенными свойствами и характеристиками, которые также можно квалифицировать как разнообразие целостных особенностей (а не структур и состава), а именно – наличие антитяготения и определенной плотности энергии (самой большой по сравнению с плотностью энергии видимого и скрытого вещества).

Согласно В.А. Рубакову, в отличие от "нормальной" материи темная энергия обладает рядом свойств, связанных с уже упомянутыми характеристиками. Она не скучивается, не собирается в объекты типа галактик или их скоплений; темная энергия "разлита" по Вселенной равномерно. Далее - темная энергия заставляет Вселенную расширяться с ускорением, чем темная энергия тоже разительно отличается от нормальной материи. Еще одно свойство темной энергии состоит в том, что ее плотность не зависит от времени, что тоже удивительно: Вселенная расширяется, объем растет, а плотность энергии остается постоянной [30].

Таким образом, темная энергия как космический вакуум в своем целостном виде обладает определенным разнообразием характеристик и свойств, по которым эта форма материи определяется и отличается от других форм материи (темной массы и барионной материи). Это уже не структурная, но связанная с темной материей информация. Здесь мы встречаемся с различием связанной и структурной информации, которые в основном совпадали в обычном – вещественном мире, которой изучала наука. Поэтому будем считать, что информация в темной энергии все же существует, но это не структурная информация, а связанная с целостными свойствами и характеристиками темной энергии. Но это соответствует концепции информации, основанной на категории разнообразия, поскольку разнообразие не сводится только к разнообразию состава, структуры, связей и т.д. Это может быть и разнообразие свойств и целостных характеристик темной энергии. Здесь есть и отражение – воздействие космического вакуума на невакуумные фрагменты Вселенной, вызывающее ее расширение с ускорением.

В случае темной энергии мы имеет дело с разнообразием свойств, или характеристик темной энергии как целостной формы материи. Пока нам известны всего несколько целостных свойств этой формы материи. Можно считать в первом приближении, что количество информации в темной энергии минимально по сравнению с другими упомянутыми формами и составляет минимально возможное количество, которое еще надо определить. Поэтому следует согласиться с И.М. Гуревичем, что структурной информации (а он имел в виду именно этот тип информации) в темной энергии нет, разумеется, по современным представлениям об этой форме материи.

Итак, можно сделать вывод, что предположение о существовании информации во всей неживой природе подтверждается в связи с открытием новых форм материи. В каждой форме материи существование информации имеет свои особенности, однако во всех формах материи информация существует, причем не только как разнообразие, а именно как отраженное разнообразие.

Количество примеров нетривиального использования информатики в науках о неживой природе можно было бы значительно увеличить, однако их, по-видимому, вполне достаточно, чтобы присоединиться к мнению о том, что информация существует объективно, представляя собою существенное свойство материи и в этом смысле, надо полагать, она распространяется и на неживую природу.

Информация, как таковая, тоже никогда не возникает, она является, по-видимому, таким же неотъемлемым свойством материи, как и пространство, время, движение и т. д. Однако можно говорить о возникновении способности использования информации, то есть управления. Использование информации (а отсюда и такие ее свойства, как ценность, а затем и смысл) действительно возникает впервые с появлением живых существ как генетически первичных кибернетических систем (хотя элементы, прообразы этого использования можно обнаружить и в неживой природе в различных формах квазиуправления и обратной связи).

«Управление не существовало до появлении жизни, – писал В.А. Трапезников,– оно возникло вместе с ее зарождением. Этот отличительный признак можно считать более характерной чертой живых организмов, чем наличие обмена с окружающей средой, который может наблюдаться и в неживой природе, или чем материал, из которого построены живые организмы на Земле. Ведь никем не доказано, что в иных мирах невозможны иные физико-химические основы живых организмов. Но никто не может оспорить тот очевидный факт, что без систем управления не мог бы существовать ни один живой организм» [31].

Известны четыре основных вида движения информации: восприятие, хранение, передача и переработка. Характерным отличием неживой природы от живой является то, что в ней отсутствует весьма важный вид движения информации – ее переработка специальными выделенными для этого частями неживых объектов (хотя это пока лишь гипотеза). Объекты неживой природы могут воспринимать, хранить и передавать информацию в процессе их взаимодействия с другими объектами. Однако всякое взаимодействие, кроме энергетического аспекта, имеет и информационный. Любое взаимодействие осуществляется благодаря каким-то материальным носителям – веществу или полю. В неживой природе информационные процессы «затемнены» энергетическими, в той или иной степени не выделены из них. Любая система неживой природы участвует в информационном процессе как бы «всем телом», всей структурой (системой, если у нее структура отсутствует). У нее нет специального органа, отдела, который специализировался бы преимущественно на одном свойстве – информации. В отличие от этого, системы живой природы обладают такой структурой, благодаря которой они способны выделять, использовать информационный аспект взаимодействия (например, нервные клетки, тот или иной тип нервной системы и т. д.).

Что же следует понимать под сложным? Наиболее распространено понимание сложного как суммы частей, элементов. И.Б. Новик пишет: «Сложность прежде всего характеризуется как сложенность из элементов» [32]. Оказывается, формулы количества информации позволяют установить сложность объектов в количественном и в определенной степени в качественном отношении.

Методы теории информации позволяют определять сложность физических объектов (динамических систем, квантовых ансамблей и т. д.), химических веществ. Наиболее широко классическая теория информации проникла в биологический комплекс наук, где в первом приближении была оценена сложность различных составляющих организма на уровне молекул, клеток, органов. Удалось оценить сложность организмов от одноклеточных до человека.

Вообще же поиски методов оценки сложности объектов представляют сейчас большой интерес для биологов, психологов и для ученых других специальностей. Возьмем для примера проблему происхождения жизни. Какой сложностью должна обладать система по отношению к окружающим условиям, чтобы ее можно было назвать живой? Предполагается, что первоначально возникшая на Земле самовоспроизводящая молекула должна содержать не менее 200 битов относительно окружающей среды, то есть относительно более простых химических соединений.

Под системой имеет смысл понимать организованное множество, образующее целостное единство. Структура есть своего рода инвариант системы. Характеризуя структуру, мы учитываем не все разнообразие элементов, связей, отношений системы, а лишь нечто устойчивое, сохраняющееся.

Говоря об исследовании систем, нельзя не остановиться на такой важной в методологическом отношении проблеме, как проблема упрощения. Понятия, теории и другие формы научного познания выступают как в известном смысле упрощенные образы объективно-реальных явлений. Вместо бесконечного числа свойств, связей,) отношений даже одного изучаемого объекта приходится изучать их ограниченное, конечное количество. Короче говоря, любой акт познания из бесконечного количества информации выделяет лишь некоторое конечное количество. Но упрощение объективной реальности в познании не означает, что разнообразие не присуще материи, что оно объективно не существует. У.Р. Эшби [11] показывает, например, что число различных элементов (атомов в видимой вселенной, событий на атомном уровне, происшедших за время существования Земли и т. д.) оказывается близким к 10^{100}. Еще большие числа получаются, если перейти к комбинациям, отношениям элементов и т. л. Поэтому системы, даже состоящие из десятков элементов, в действительности могут характеризоваться астрономическими цифрами. Познание таких систем неизбежно связано с их упрощением. Возникает вопрос о степени этого упрощения. Если степень упрощения окажется низкой, то теория систем эффективна лишь для узкого круга систем, ибо она будет отражать в основном их особенности. Если степень упрощения высока, то упрощение может легко перейти в сверхупрощение, и тогда общая теория систем не будет эффективной для изучения всех достаточно сложных систем.

Изменение информационного содержания систем – это количественный критерий развития. Зная разнообразие системы в один момент времени, то есть состояние системы, мы можем определить, как изменилось это разнообразие (состояние) в другой момент времени. Если это разнообразие увеличилось на уровне элементов системы, то можно сказать, что на этом уровне система развивается прогрессивно. Если в этой же системе произошло уменьшение связей, то мы говорим, что на уровне организации объект развивается регрессивно. Количество разнообразия, заключенное в системе, то есть степень сложности, упорядоченности, организации, определяет степень развития системы в данном отношении.

Степень развития выступает как главная характеристика развития с точки зрения количественного информационного критерия. Зная степень развития в различные моменты времени, мы всегда сможем определить направление развития. Если нам известно количество информации в системе, мы всегда можем установить его изменение во времени, то есть динамику и темпы развития.

Наиболее сложные макромолекулы – это нуклеиновые кислоты и белки. Полимеры нуклеиновых кислот являются неоднородными, апериодическими, что позволяет им аккумулировать большие количества информации, чем однородным полимерам. Измерение информационного содержания ряда химических соединений показало, что в результате химической эволюции в общем происходило увеличение количества информации.

Первые живые существа содержали по сравнению с молекулами колоссальные количества информации. Современные оценки, еще, к сожалению, весьма грубые, указывают лишь примерный порядок информационного содержания одноклеточных организмов или яйцеклеток.

В яйце в самом начале его развития можно различить следующие основные структуры. Во-первых, ядро, в хромосомах которого содержатся гены, во-вторых, его окружение – цитоплазму с корпускулярными включениями и, наконец, тонкий поверхностный слой цитоплазмы – кортикальный слой яйца.

Особое значение теория информации имеет для самопознания науки, в первую очередь изучающая законы мироздания. Понятие закона отражает общие, устойчивые связи и отношения между явлениями (или его частями). Любой закон есть ограничение разнообразия в том смысле, что явление не может полностью определяться законом. Весьма интересной проблемой является сравнение различных законов по их информационным характеристикам: количеству информации, ее ценности и т. д. Рассмотрим, например, как различаются по количественным информационным характеристикам законы физики, подчиняющиеся так называемому принципу соответствия. Такими законами, как известно, являются законы классической, релятивистской механики и теории гравитации А. Эйнштейна (общей теории относительности), с одной стороны, или же законы классической и квантовой механики, с другой стороны.

Законы общей теории относительности переходят в законы специальной теории относительности при отсутствии тяготеющих масс. Законы релятивистской механики переходят в законы классической механики при малых по сравнению со скоростью света скоростях движения. Квантовая механика отражает движение микрообъектов с очень малой (по сравнению с макрообъектами) массой и при относительно больших скоростях движения – в этих условиях необходимо учитывать постоянную Планка. Однако если эту постоянную приравнять к нулю (то есть перейти к большим массам), то законы квантовой механики перейдут в законы классической механики.

Если переходят от законов более общей теории к законам менее общей (частной) теории, то отвлекаются от некоторых различий (тяготения, постоянной Планка и т.д.). Правда, при этом может происходить не только ограничение разнообразия, но и увеличение некоторых классов разнообразия (вводимых понятий, методов и т.д.).

Благодаря теории информации мы сможем точно определить, какое количество информации содержится в законах специальной теории относительности, общей теории относительности, в квантовой теории и т.д.

А это необходимо, например, для развития теории и технологии использования научной информации. Ведь законы представляют часть научной информации, которую нужно хранить, передавать, перерабатывать. А для этого важно знать, какое количество информации они содержат. Можно представить еще более далекое будущее, когда человечество станет передавать свои научные знания другой, внеземной цивилизации. Естественно, что межзвездные информационные связи уместны лишь в том случае, если удастся передавать научную информацию. Возможно, именно тогда станет очевидным, что современные попытки определения информационного содержания законов науки – это начало нового направления фундаментальных исследований.

Очень важно, например, оценить какой объем информации содержат начальные неоднородности (существовавшие в момент Большого взрыва), которые должны были содержать в закодированной форме физические законы, «программирующие» дальнейшее существование и развитие Вселенной. И.М. Гуревич, оценивая объем информации, содержащейся в законах природы, показал, что при инфляционном расширении Вселенной из информации, содержащейся в начальных неоднородностях Вселенной массы 10 в четвертой степени кг, формируется объем информации, примерно 10 в седьмой степени бит классической информации, достаточный для кодирования (записи) физических законов [8-9].

В современной научной литературе существуют и попытки приложения концепции информации к анализу наиболее зрелой формы научного познания – теории. Каким же образом определяются информационные характеристики теорий и в чем они заключаются?

Наука обычно определяется как сфера деятельности людей по производству знаний, то есть как некоторый процесс отражения реальности, и как определенная система знаний. Рассмотрение науки как важного вида процесса отражения ведет к выводу о возможности анализа развития науки с позиций теории информации. Научное знание – это определенный вид информации. В последнее время наряду с понятием «научное знание» употребительным становится понятие «научная информация». Рождение последнего связано с появлением новой научной дисциплины – теории научной информации (как научной информатики).

Научная информация – это получаемая в процессе познания информация (фиксируемая в системе точных понятий, суждений, умозаключений, теорий, гипотез), которая адекватно отображает явления и законы внешнего мира или духовной деятельности людей и дает возможность предвидения и преобразования действительности в интересах общества.

Л. Бриллюэн [5] предложил схему, в соответствии с которой можно определить содержание информации в теории, устанавливающей связи между эмпирическими законами.

Информация, таким образом, присуща как материальному, так и идеальному. Она применима и к характеристике материи, и к характеристике сознания (познания). Если объективная (и потенциальная для субъекта) информация может считаться свойством материи, то идеальная, субъективная информация есть отражение объективной, материальной информации (включая и опережающее отражение).

Здесь неуместно рассматривать историю развития информации, поскольку это уже изложено в монографии К.К. Колина [33], а выскажу свои соображения по поводу того, что она изучает и каково ее место в современной науке в связи с изложенным выше о всеобщем характере информации.

Так или иначе, информатика оказалась связанной с понятием информации, о чем свидетельствует даже ее название. Несколько лет назад вышла книга с характерным названием «Информатика как наука об информации» [34]. Это название в лапидарной форме определяет понятие «информатика». В принципе, действительно информатика – это наука об информации и поэтому на ее содержание и сферу распространения по пространству научного знания влияет понимание того, что представляет собой информация.

Если информатика – наука об информации, то для этой науки важно ответить на вопросы, что представляет собой информация (какова ее природа, содержание, определение) и какова сфера распространения информации в мироздании. Этот последний вопрос, или лучше сказать, проблема связана с тем, что не все ученые признают наличие информации в неживой природе. Потому, несколько расширяя понимание информатики, можно сказать, что информатика – это наука об информации и законах ее существования, движения и даже развития. Такое широкое определение понятия «информатики» представляется мне вполне правомерным, учитывая дискуссионность вопросов о сфере существования информации и то, что не все виды информации находятся в состоянии движения (но и как в космическом вакууме в состоянии покоя). Кроме того, здесь подчеркивается и роль информации в процессах эволюции в мироздании, где она выходит на приоритетные позиции [35].

Если иметь в виду сферу существования информации не в реальности, а в научном знании, то уже стал общепризнанным тезис, который я предложил несколько десятков лет тому назад об общенаучном статусе понятия «информации». Этот тезис был выдвинут, когда я разрабатывал и обосновывал новый тип научного знания, который пришлось выделить из философского и частнонаучного знания – медисциплинарно-общенаучного знания [36]. Понятие информации, которое только появилось в науке, стремительно распространялось по научным дисциплинам представлялось мне тогда в качестве одного из кандидатов на обретение общенаучного статуса. Замечу, что когда я предположил возможность становления общенаучного статуса информации, то обращал внимание, что речь идет в основном об использовании информационных подходов и методов, которые в определенной степени абстрагируются от того, существует ли информация в неживой природе. Хотя более полноценный общенаучный статус зависит от того, признается ли информация всеобщим свойством материи или же существует только в живой и неживой природе.

Поэтому следует различать гносеологический аспект общенаучного статуса, следующий из использования понятия информации и информационных подходов, и онтологические основания общенаучности, что уже зависит от признания атрибутивного характера информации. Но, если по гносеологическому аспекту общенаучного характера информации споров практически нет, то по онтологическому статусу существует достаточно выраженные точки зрения, основные из них квалифицируются как атрибутивная, функциональная и социоцентрическая.

Функциональная концепция информации, связывает информацию с управлением и самоуправлением (но не с самоорганизацией, которая имеет место и в неживой природе), ограничивая сферу распространения информации только биологической и социальными ступенями эволюции. Социоцентрическая точка зрения считает информацию свойством человеческого сознания, что еще более существенно сужает сферу и возможности применения информации и информатики как общей науки об информации.

Как функциональная, так и социоцентрическая концепции информации, по сути, априори заявляют, что в неживой природе информация отсутствует. Такой вывод делается не на основе анализа довольно обширной литературы по использованию концепции информации и информационного метода в науках о неживой природе. Ясно, что с теоретико-познавательной точки зрения накладывание упомянутых ограничений сразу же отсекает возможные попытки исследования информации и информационных процессов в неживой природе.

Но этой «максимой» пользуются лишь сами упорные сторонники ограничительных концепций. Для атрибутивистов как сторонников тезиса о всебщности информации подобные ограничения неубедительны и вряд ли какой-то ученый-естественник найдет что-то позитивное в любых ограничительных императивах. Здесь явное этическое нарушение права свободного научного творчества и поэтому любые ограничительные тенденции, причем, не только в науке, приводят к желаемому эффекту. Вот почему в действительности со временем увеличивается число атрибутивистов, особенно среди естествоиспытателей (что легко определить по все растущему числу их работ и решаемых ими проблем).

Однако, несмотря на желание функционалистов (а тем более - социоцентристов) ограничить сферу приложения концепции информации, все больше появляется ученых, которые находят свои собственные пути обоснования существования информации в неживой природе. Количество примеров и областей такого рода все увеличивается и можно считать, что территория функционалистов (как социоцентристов) все уменьшается, но пока еще не достигла нулевого масштаба. Да и ограничительная позиция в эпистемологическом смысле оказывается весьма уязвимой: ведь все, что оказывается позитивным в функциональной и социоцентрической концепциях, признают и атрибутивисты, кроме, естественно отрицания информации в неживой природе. Поэтому позитивного методологического значения для науки упомянутые ограничительные концепции не имеют, создавая досадное впечатление создания явно вымышленных проблем (псевдопроблем).

Вот почему я полагаю, что доказательство всеобщности существования информации – это одна из задач или даже целей информатики, хотя само доказательство этого тезиса лежит не столько на информатике, сколько на всей науке в целом и, особенно, на науках о неживой природе. Ведь в большинстве случаев попытки и опыт применения концепции информации и информационного подхода в науках о неживой природе «падает» на специалистов в области этих наук, а не на специалистов в области информатики. Эти последние больше занимаются своими «внутренними» проблемами, и, скорее всего, углубляют эту стремительно развивающуюся дисциплину, чем распространяют методы информатики в другие отрасли знания.

Однако полностью переносить задачу доказательства существования информации в неживой природе на «неинформатиков», вряд ли имеет смысл, поскольку все научное знание об информации все же концентрируется и систематизируется в науке об информации - информатике.

Современная структура предметной области информатики, предложенная К.К. Колиным [37] в Институте проблем информатики РАН еще в 1995 г., выглядит следующим образом:

1. Теоретические основы информатики.
2. Техническая информатика.
3. Социальная информатика.
4. Биологическая информатика.

5. Физическая информатика.

Эти достаточно крупные самостоятельные направления научных исследований, вполне естественно, будут и далее дифференцироваться. Что касается неживой природы, которая изучается естественными науками, то кроме физики, есть много других научных дисциплин и наименование новых видов информатики, скорее всего, будет продолжаться по соответствующим наукам, тем более, что в каждой из них уже имеются «информационные заделы». Может также появиться в плане дифференциации «физической информатики», например, астрономическая или даже космологическая информатика.

Давая вышеприведенную структуризацию, К.К. Колин исходил из того, что в каждой из четырех видов информатики (кроме первого), существует своя разновидность информационной среды, в которой собственно и реализуются информационные процессы и которая оказывает существенное влияние на специфику проявления в этой среде общих информационных закономерностей, изучаемых наиболее общей – теоретической информатикой.

Правомерность предложенной К.К. Колиным структуризации информатики, подтверждают дисциплинарный и эволюционный подходы, которые вместе с тем также могут внести те или иные коррективы в приведенную выше структуризацию предметной области информатики. Это в основном касается той области, которая уже получила наименование «физической информатики», поскольку неживая природа, кроме чисто физических объектов, содержит и химические соединения, подчиняющиеся также своим собственным законам. Поэтому вполне можно выделить, наряду с физической информатикой также «химическую информатику», тем более, что работы в этой области ведутся уже более полувека, хотя и менее известны, чем в области физической информатики [см. в этой связи статью И.М. Гуревича и В.Н. Павлова в этом сборнике].

В свою очередь, возможно дальнейшее дробление указанных выше предметных областей, например, та же физическая информатика может включить в себя уже упомянутую астрономическую (космологическую) и другие виды (или подвиды) информатик. Признание всеобщности информации ориентирует на такое дальнейшее выделение новых видов информатик либо тем или иным научным дисциплинам (гносеологическая дифференциация) либо по эволюционным структурам неживой природы. Поэтому то, что сейчас крупным планом видится как «физическая информатика» скорее предстает как «информатика неживой природы», которая включает в себя, по меньшей мере, физическую и химическую отрасли информатики.

Вместе с тем, можно предвидеть появление научных направлений исследования в области информатики и в проблемно-интеграционном ракурсе. Ведь концепция информации и информационный подход хорошо вписываются в междисциплинарные исследования, число которых существенно возрастает и именно в этих направлениях научного поиска происходит сейчас самый быстрый рост научного знания. Примером такого интегративного направления является глобалистика, исследующая глобальные процессы и системы и использующая понятия и методы различных наук, в том числе и информатики. А поскольку такой процесс как информатизация обретает уже глобальный характер, то изучение синтеза глобализации и информатизации приводит к появлению как «глобальной информатики», так и «информационной глобалистики», идеи которой уже начали развиваться в научной литературе [38]. Впрочем, аналогичные процессы происходят и в других отраслях научного знания, где информатизация и глобализация интегрируются на предметном поле конкретных наук, например, в юриспруденции [39-40].

Библиографический список использованных источников

1. Информационный подход в междисциплинарной перспективе («круглый стол») // Вопросы философии. – 2010. – № 2.

2. Урсул А.Д. О природе информации / А.Д. Урсул // Вопросы философии. – 1965. – № 3.

3. Урсул А.Д. К обсуждению определения понятия «информация» / А.Д. Урсул //

Научно-техническая информация. – 1966. – № 7.

4. Урсул А.Д. Природа информации. Философский очерк / А.Д. Урсул. – М.: ПОЛИТИЗДАТ. – 1968. – 288. (немецкий перевод: Ursul A.D. Information. Eine philophische Studie. Berlin: Dietz Verlag. 1970).

5. Урсул А.Д. Информация. Методологические проблемы / А.Д. Урсул. – М.: Наука. – 1971.

6. Чернавский Д.С. Синергетика и информация / Д.С. Чернавский. – М.: ЛИБРОКОМ. – 2001.

7. Колин К.К. Природа информации и философские основы информатики / К.К. Колин // Открытое образование. – 2005. – № 2.

8. Гуревич И.М. Законы информатики – основа строения и познания сложных систем. Изд. второе уточненное и дополненное / И.М. Гуревич – М.: «Торус Пресс». 2007. 400 с.

9. Гуревич И.М. Информация – всеобщее свойство материи. Характеристики. Оценки. Ограничения. Следствия / И.М. Гуревич, А.Д. Урсул // – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». – 2012. – 312 с.

10. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. / У.Р Эшби – М.: – 1959.

11. Эшби У.Р. Несколько замечаний / У.Р Эшби // Общая теория систем. – М.: Мир, 1966.

12. Шмалъгаузен И.И. Количество фенотипической информации о строении популяции и скорость естественного отбора / И.И. Шмалъгаузен // Применение математических методов в биологии. – Л.: Изд-во ЛГУ, – 1960.

13. Глушков В.М. О кибернетике как науке / В.М. Глушков // Кибернетика, мышление, жизнь. – М.: Мысль, – 1964. – С. 53–54.

14. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон – М.: ИЛ, – 1963.

15. Бриллюэн Л. Теория информации и ее приложение к фундаментальным проблемам физики / Л. Бриллюэн // Развитие современной физики. – М.: Наука. – 1964.

16. Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информация / Л. Бриллюэн – М.: ИЛ. – 1960.

17. Кастлер Г. Возникновение биологической организации / Г. Кастлер – М.: Мир. – 1967.

18. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия «количество информации» / А.Н. Колмогоров // Проблемы передачи информации. – 1965. – Т. I. Вып. 1.

19. Колмогоров А.Н. Проблемы теории вероятностей и математической статистики / А.Н. Колмогоров // Вестник АН СССР. – 1965. – № 5.

20. Rashevsky N. Life, Information Theory and Topology / N. Rashevsky // The Bulletin of Mathematical Biophysics. – Chicago. – 1955. – Vol. 17. № 3.

21. Амосов Н.М. Мышление и информация / Н.М. Амосов // Проблемы мышления в современной науке. – М.: Мысль. – 1964.

22. Лебедев Д.С. Перенос информации электромагнитным полем / Д.С. Лебедев, Л.Б. Левитин // Проблемы передачи информации. – 1964. – Вып. 6. Теория передачи информации.

23. Урсул А.Д. Научная картина мира XXI века: темная материя и универсальная эволюция / А.Д. Урсул // Безопасность Евразии. – 2009. – № 1.

24. Гуревич И.М. Физическая информатика / И.М. Гуревич. – Саарбрюккен: LAP. – 2012.

25. Вольфсон А.Ф. К вопросу о математическом описании зональности эндогенного оруднения / А.Ф. Вольфсон // Известия АН СССР. Серия геологическая. –1969. – № 6.

26. Гуревич И.М. Информационные характеристики физических систем / И.М. Гуревич. – М.-Севастополь: – 2009.

27. Сейфуль-Мулюков Р.Б. Нефть – углеводородные последовательности: анализ

моделей генезиса и эволюции / Р.Б. Сейфуль-Мулюков – М.: – 2010.

28. Арманд А.Д. Природные комплексы как саморегулируемые информационные системы / А.Д. Арманд // Известия АН СССР. Серия географическая. – 1966. – № 2.

29. Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул / М. Эйген. – М.: Мир. – 1973.

30. Рубаков В.А. Темная энергия во Вселенной / В.А. Рубаков // В защиту науки. – 2010. – № 7.

31. Трапезников В. Кибернетика и автоматическое управление / В. Трапезников // Возможное и невозможное в кибернетике. – М.: Наука. – 1963.

32. Новик И.Б. Философские идеи Ленина и кибернетика / И.Б. Новик // – М.: ПОЛИТИЗДАТ. – 1969.

33. Колин К.К. Теоретические проблемы информатики / К.К. Колин // – М.: КОС ИНФ. – 2009. – Т. 1. Актуальные философские проблемы информатики.

34. Информатика как наука об информации: Информационный документальный, технологический и организационный аспекты / Под ред. Р.С. Гиляровского, автор–составитель В.А. Цветкова. – М.: ФАИР_Пресс, – 2006.

35. Глобальный эволюционизм: Идеи, проблемы, гипотезы / И.В. Ильин, А.Д. Урсул., Т.А.м Урсул – М.: Изд-во МГУ, – 2012.

36. Урсул А.Д. Философия и интегративно-общенаучные процессы / А.Д. Урсул. – М.: Наука. – 1981.

37. Колин К.К. Фундаментальные проблемы информатики / К.К. Колин // Системы и средства информатики: Сб. научн. тр. – М.: Наука. – 1995. – Вып. 7.

38. Урсул А.Д. На пути к информационной глобалистике / А.Д. Урсул // Политика и общество. – 2012. – №2.

39. Информационные отношения и право // Рос. Акад. Правосудия. : Сб. научн .тр. – М.– 2006. – Вып.1. Под ред. В.В. Ершова, Д.А. Ловцова.

40. Урсул А.Д. Глобализация права и глобальное право: концептуально-методологические проблемы / А.Д. Урсул // Право и политика. – 2012. – № 8.

УДК 004.75
А.В. Скатков, д-р техн. наук, профессор,
Д.Ю. Воронин, канд. техн. наук, ст. преподаватель
Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь, Украина
dima@voronins.com

МЕТОДЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУРАХ

Функционирование энергетических, транспортных, производственных и экологических систем является критическим в том смысле, что незначительные сбои при их взаимодействии могут привезти к авариям в большинстве случаев носящих характер катастроф. В настоящее время вопросам обеспечения функциональной безопасности критических инфраструктур (КИ) уделяется особое внимание [1]. Развитие информационных технологий поддержки принятия решений по синтезу и управлению КИ должно основываться на учете особенностей организации функционирования таких систем. Критичность рассматриваемых объектов, нестационарность складывающихся информационных ситуаций, дефицит априорной информации и необходимость учета многопродуктовых потоков при комплементарном распределении ресурсов в совокупности формирует актуальность рассматриваемой в докладе задачи, которая имеет множество приложений.

Процессы принятия решений в КИ сопряжены с необходимостью в режиме реального времени обеспечить баланс между различными системами, имеющими противоречивые целевые функции. Таким образом, к результативности структуры КИ, целенаправленности ее функционирования и рациональному взаимодействию ее элементов предъявляются повышенные требования. Основная проблематика, связанная с развитием научных знаний этой в области обусловлена отсутствием эффективных информационных технологий комплементарной диспетчеризации, т.е. ориентированных на обеспечение потенциала КИ.

Потенциал КИ — достижимый максимум эффективности функционирования КИ, который возможно обеспечить только при наилучшем варианте организации КИ и наиболее благоприятном характере взаимодействия ее структурных элементов [2]. Величина реализованного потенциала зависит от целенаправленности функционирования и взаимной согласованности всех систем КИ, рационального взаимодействия ее элементов и результативности структуры в целом. Очевидно, что отличительное свойство КИ – способность к эволюции – может способствовать обеспечению ее потенциала.

Различают комплементарные и некомплементарные, сбалансированные и несбалансированные КИ. Две системы КИ являются комплементарными, если продукт, вырабатываемый *i*-ой системой КИ, является ресурсом для синтеза продукта *j*-ой системой (и наоборот). В качестве элементарного примера комплементарных систем рассмотрим взаимодействие производственной и энергетической системы. Для производства товаров необходима электроэнергия, которая оплачивается за счет средств, полученных от реализации данных товаров. При дефиците электроэнергии производственные мощности будут простаивать и за счет нарушения требований по комплементарной диспетчеризации потенциал КИ не будет достигнут. Очевидно, что некомплементарные системы не могут быть сбалансированными.

Задача обеспечения баланса в комплементарной КИ может быть сформулирована на основе принципов, сформулированных в [3]. Имеется k систем КИ, выпускающих разнотипные продукты объемом $\omega_{i,r}$, причем $i, j = 1, \ldots, k \cdot n$ – номер системы, $r = 1, \ldots, n$ – тип синтезируемого продукта. Так как КИ является комплементарной, то $\forall i, j = 1, \ldots, k \cdot n$ известны затраты $c_{j,rp}$, связанные с переработкой *j*-ой системой единицы продукта *r*-ого типа (ресурса, используемого при производстве продукта *p*-ого типа).

Как правило, в некомплементарных КИ существуют системы, которые производят невостребованный продукт. Таким образом, для комплементарных КИ справедливо равенство (1), учитывающее отсутствие процессов синтеза невостребованного продукта:

$$\forall\, r = 1, \ldots, n: \quad \sum_j \sum_i \omega_{ij,r} = \sum_i \sum_j \omega_{ij,r}\,, \tag{1}$$

где $\omega_{ij,r}$ – объем продукта *r*-ого типа, поставляемого от *i*-ой системы для *j*-ой.

Необходимо отметить, что синтезируемый продукт является не только предметом экспорта, но и обеспечивает функционирование и эволюционное развитие КИ. Выражение (2) учитывает, что объем продукта *r*-ого типа, потребляемый *j*-ой системой является суммой величин $z_{j,r}$ и $e_{j,r}$ при отсутствии ограничения $i \neq j$.

$$(\forall\, i, j = 1, \ldots, k \cdot n) \wedge (\forall\, r, p = 1, \ldots, n): \quad \sum_i \omega_{ij,r} = z_{j,r} + e_{j,r}\,, \tag{2}$$

где $\sum_i \omega_{ij,r}$ – объем продукта *r*-ого типа, поставляемого для *j*-ой системы; $z_{j,r} = \sum_p m_{j,rp} \sum_k \omega_{jk,p}$ – объем внутреннего потребления продукта *r*-ого типа для организации функционирования *j*-ой системы; $e_{j,r}$ – объем внутреннего потребления продукта *r*-ого типа для эволюционного развития j-ой системы; $m_{j,rp}$ – объем продукта *r*-ого типа (ресурса), необходимого *j*-ой системе для синтеза единицы продукта *p*-ого типа. Балансовое соотношение (2) учитывает функциональные особенности КИ и ее способность к эволюции.

Предлагаемая СППР по обеспечению потенциала КИ (структура изображена на рисунке 1) ориентирована на решение проблем по трем основным взаимосвязанным направлениям (анализ, управление и мониторинг КИ) и базируется на следующих аксиоматических положениях: 1.

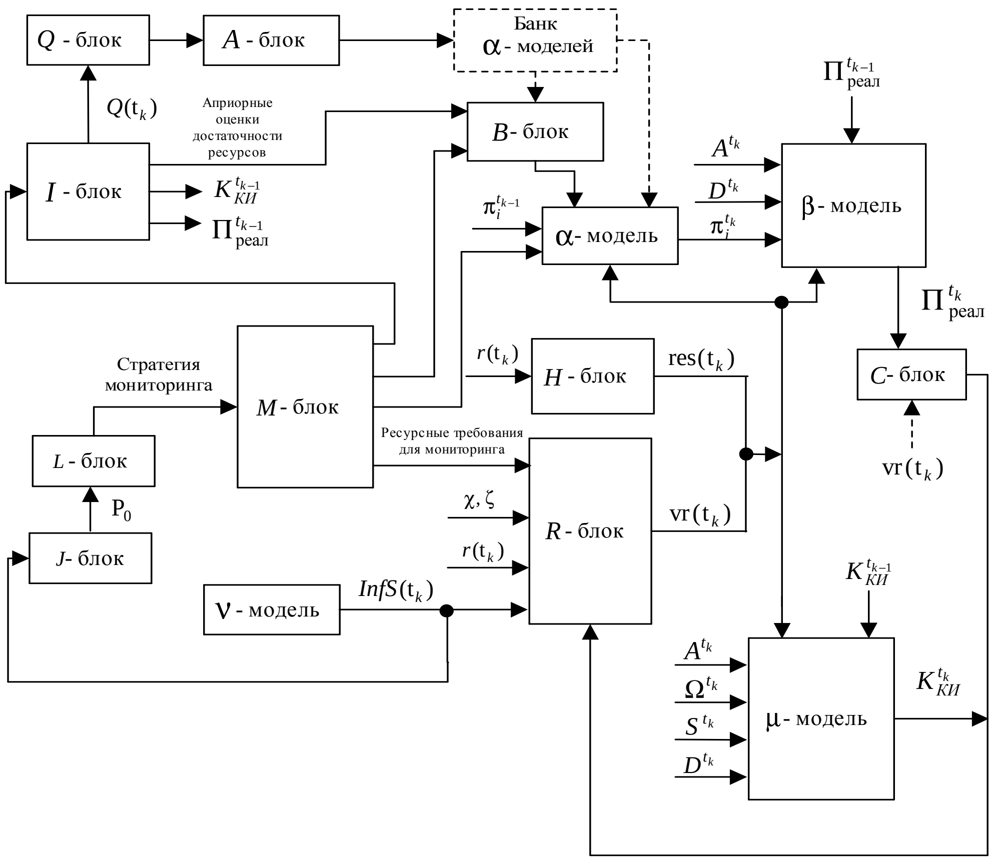


Рисунок 1 – Иерархическая структура ядра СППР по обеспечению потенциала КИ

Формализация КИ требует иерархического уровня детализации ее функций и структуры; 2. Процессы моделирования в КИ требуют их диверсификации и квалиметрии; 3. Необходимо использование интегральных характеристик качества решения функциональных задач КИ, в качестве такой характеристики предлагается использовать «потенциал» как меру уровня многопродуктового баланса ресурсов и продуктов, которыми обмениваются системы в КИ, а также ценовыми соотношениями спросов и предложений; 4. Уровень взаимодействий системообразующих факторов в КИ определяет ее особую характеристику – уровень межсистемной комплементарности.

На рисунке 1 использованы следующие обозначения:

I -блок – блок сбора и обработки априорной информации о функционировании КИ;

Q -блок – блок иерархической декомпозиции структуры КИ;

A -блок – блок диверсификации и квалиметрии моделей;

J -блок – блок увеличения скорости сходимости адаптивного выбора стратегии мониторинга КИ;

L -блок – блок адаптивного выбора стратегии мониторинга КИ;

M -блок – блок мониторинга технических мегасостояний КИ;

α -модель – модель апостериорной оценки уровня реализации потенциала одной из систем КИ;

B -блок – блок адаптивного выбора α -модели;

ν -модель – модель идентификации информационной ситуации, складывающейся в КИ;

R -блок – блок адаптивной настройки процесса распределения ресурсов (процедура управления КИ в условиях неопределенности);

H -блок – блок распределения ресурсов в условиях полной информации (процедура управления КИ);

β -модель – модель апостериорной оценки уровня реализации потенциала КИ;

μ -модель – модель оценки апостериорного уровня межсистемной комплементарности в КИ;

C -блок – блок оценки функции потерь;

$A^{t_k} = \left\{ a_1^{t_k}, a_2^{t_k}, a_3^{t_k} \dots a_n^{t_k} \right\}$ – вектор цен на продукты в КИ (здесь и далее верхний индекс сопоставлен идентификатору момента времени); $a_i^{t_k} = \left\{ \hat{a}_{i1}^{t_k}, \hat{a}_{i2}^{t_k}, \hat{a}_{i3}^{t_k} \dots \hat{a}_{im}^{t_k} \right\}$; $\hat{a}_{ij}^{t_k}$ – цена в i-ой системе КИ на продукт j-ого типа;

$D^{t_k} = \left\{ d_1^{t_k}, d_2^{t_k}, d_3^{t_k} \dots d_n^{t_k} \right\}$ – вектор спроса на продукты в КИ; $d_i^{t_k} = \left\{ \widehat{d}_{i1}^{t_k}, \widehat{d}_{i2}^{t_k}, \widehat{d}_{i3}^{t_k} \dots \widehat{d}_{im}^{t_k} \right\}$; $\widehat{d}_{ij}^{t_k}$ – спрос в i-ой системе КИ на продукт j-ого типа;

$\Omega^{t_k} = \left\{ \omega_{11}^{t_k}, \omega_{12}^{t_k}, \omega_{13}^{t_k} \dots \omega_{mn}^{t_k} \right\}$ – потребность продукта в КИ; $\omega_{ij}^{t_k} = \left\{ \omega_{ij,1}^{t_k}, \omega_{ij,2}^{t_k}, \omega_{ij,3}^{t_k}, \cdots, \omega_{ij,q}^{t_k} \right\}$; $\omega_{ij,q}^{t_k}$ – объем продукта q-ого типа, синтезированного i-ой системой КИ и потребляемого j-ой системой в момент времени t_k.

$S^{t_k} = \left\{ s_{11}^{t_k}, s_{12}^{t_k}, s_{13}^{t_k} \dots s_{mn}^{t_k} \right\}$ – вектор затрат, связанных с переработкой ресурса в продукт в КИ; $s_{rp}^{t_k} = \sum_i \sum_j c_{ij,rp}^{t_k}\, \omega_{ij,r}^{t_k}$, где $c_{ij,rp}^{t_k}$ – затраты, связанные с переработкой j-ой системой единицы продукта r-ого типа (полученного от i-ой системы и используемого j-ой при производстве продукта p-ого типа).

$\pi_i^{t_{k-1}}$ – априорная оценка реализации потенциала i-ой системы КИ;

$\pi_i^{t_k}$ – апостериорная оценка реализации потенциала i-ой системы КИ;

$\Pi_{\text{реал}}^{t_{k-1}}$ – априорная оценка реализации потенциала КИ;

$\Pi_{\text{реал}}^{t_k}$ – апостериорная оценка реализации потенциала КИ;

$\mathrm{res}(\mathrm{t}_k)$ – вариант комплементарного распределения ресурсов КИ (в условиях полной информации);

$\mathrm{vr}(\mathrm{t}_k)$ – вариант комплементарного распределения ресурсов КИ (управление в условиях неопределенности).

$\mathrm{vr}(\mathrm{t}_k) = \Psi\{\ \mathrm{X}\{\,Q(\mathrm{t}_k), r(\mathrm{t}_k), i, \mathrm{P}_0\{g, \mathit{InfS}(\mathrm{t}_k), \chi\}, \zeta\}\}$, где Ψ – оператор выбора ЛПР варианта распределения ресурсов; X – оператор формирования эффективных вариантов распределения ресурсов, полученных на основе функциональной модели, выбранной адаптивно из комплекса диверсных моделей распределения ресурсов; $Q(\mathrm{t}_k)$ – граф структуры КИ; $r(\mathrm{t}_k)$ – ресурсные ограничения; i – индекс выбранной функциональной модели по распределению вычислительных ресурсов; P_0 – оператор формирования вектора начального предпочтения; g – индекс, соответствующий версии модуля, выбранного ЛПР из КР-комплекса; $\mathit{InfS}(\mathrm{t}_k)$ – результат идентификации, который задает класс информационной ситуации, складывающейся в момент времени t_k; χ, ζ – управляющие параметры адаптивного выбора.

С целью решения задачи анализа КИ предложен метод иерархической декомпозиции, методика оценки «потенциала», метод оценки уровня комплементарности. Реализован банк моделей, ориентированных на оценку эффективности принимаемых управленческих решений, модель идентификации информационных ситуаций, а также процедуры управления, как в условиях полной информации, так и неопределенности (при использовании адаптивного подхода). Решение задач мониторинга технических мегасостояний КИ потребовало квалиметрии мониторинга и процедур увеличения скорости сходимости адаптивного выбора стратегии. Целевым назначением системы поддержки принятия решений по максимизации потенциала КИ является представление ЛПР в реальном масштабе времени необходимой информации, используемой при принятии диспетчерских решений о комплементарном распределении ресурсов КИ.

Предлагаемая СППР позволяет получить информацию, необходимую для поддержки принятия решений о комплементарном распределении ресурсов КИ, обеспечивающем максимизацию ее потенциала.

Библиографический список использованных источников

1. Безопасность критических инфраструктур: математические и инженерные методы анализа и обеспечения: монография / В.С. Харченко [и др.] – Харьков: Изд-во «ХАИ», 2011. – 641 с.

2. Информационные технологии для критических инфраструктур: монография / А.В. Скатков [и др.] – Севастополь: Изд-во «СевНТУ», 2012. – 306 с.

3. Леонтьев В.В. Избранные произведения в 3т. Т. 1: Общеэкономические проблемы межотраслевого анализа / В.В. Леонтьев. – М.: Экономика, 2006. – 407 с.

4. Скатков А.В. Управление вычислительными ресурсами распределенных критических инфраструктур / Д.Ю. Воронин, А.В. Скатков // Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. – Том 2, випуск 2. – Чернівці: Изд-во ЧНУ, 2011. – С. 6 – 12.

УДК 519.62

И.Н. Синицын, д-р. техн. наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Институт проблем информатики РАН, г. Москва, Россия
sinitsin@dol.ru

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ С ИНВАРИАНТНОЙ МЕРОЙ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

1. Введение

Рассмотрим в общем случае нестационарный стохастический режим $Z = Z(t)$, являющийся сильным решением следующего стохастического дифференциального уравнения (СДУ) Ито:

$$\dot{Z} = a(Z,t) + b(Z,t)V, \quad Z(t_0) = Z_0 \tag{1}$$

Здесь Z – k-мерный вектор состояния $Z \in \varDelta$ ($\varDelta$ – многообразие состояний), $a = a(Z,t)$ и $b = b(Z,t)$ – детерминированные $k \times 1$ и $k \times m$ функции отмеченных аргументов, $V = V(t)$ – m-мерный вектор нормально распределенных белых шумов с нулевыми математическими ожиданиями и $m \times m$-матрицей интенсивностей $v = v(t)$ и представляющий собой среднеквадратическую производную винеровского процесса $W = W(t)$, $V = \dot{W}$. Начальное состояние Z_0 представляет собой нормально распределенную случайную величину, независящую от приращений винеровского процесса $W(t)$ для $t > t_0$.

Система (1) будет стационарной, когда интенсивность v белого шума V постоянна, а функции a и b не зависят от времени, $a = a(Z,t)$ и $b = b(Z,t)$. В этом случае СДУ (1) принимает вид

$$\dot{Z} = a(Z) + b(Z)V, \quad Z(t_0) = Z_0 \tag{2}$$

Как известно [1, 2], если существуют все многомерные плотности вектора состояния Z, то определив сначала одномерную плотность $f_1 = f_1(z;t)$ и переходную плотность $f = f(z;t \mid \zeta;\tau)$ путем интегрирования уравнения Фоккера–Планка– Колмогорова (ФПК) с соответствующими начальными условиями:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} = -\frac{\partial^T}{\partial z}(af_1) + \frac{1}{2}\operatorname{tr}\left[\frac{\partial}{\partial z}\frac{\partial^T}{\partial z}(\sigma f_1)\right], \quad \sigma = bvb^T, \tag{3}$$

$$f_1(z;t_0) = f_0(z), \tag{4}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial^T}{\partial z}(af) + \frac{1}{2}\operatorname{tr}\left[\frac{\partial}{\partial z}\frac{\partial^T}{\partial z}(\sigma f)\right], \tag{5}$$

$$f(z;t \mid \zeta;\tau) = \delta(z - \zeta), \tag{6}$$

можно найти все многомерные плотности $f_n = f_n(z_1,...,z_n;t_1,...,t_n)$ по рекуррентной формуле:

$$f_n = f_n(z_1,...,z_n;t_1,...,t_n) = f_1(z_1;t_1) f(z_2;t_2 \mid z_1;t_1)...f(z_n;t_n \mid z_{n-1};t_{n-1})$$
$$t_1 \le t_2 \le \cdots \le t_n, \quad n = 2,3,.... \tag{7}$$

Для нахождения стационарных в узком смысле одно- и многомерных распределений стохастических режимов, определяемых СДУ (2), в (3) следует положить $\partial f_1 / \partial t = 0$.

Поставим задачу разработки методов аналитического моделирования многомерных плотностей f_n стохастических режимов $Z = Z(t)$, определяемых СДУ (1) (т.е. решений уравнений (3)–(6)) путем построения интегральных инвариантов специально подбираемых систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Впервые эта проблем была поставлена в 1988 году и разработана сначала для стационарных и приводимых к ним нелинейных стохастических систем [1, 3–8], а затем в [9–14] для некоторых классов нестационарных нелинейных систем.

В [1, 2, 13, 14] рассмотрены точные и приближенные методы расчета. Дадим развитие методов аналитического моделирования на основе методов построения интегральных инвариантов одно- и многомерных плотностей применительно к стохастическим системам (СтС) общего вида в том числе, а также автокоррелированными (профильтрованными) гауссовыми (нормальными) шумами. Особое внимание уделим приближенным методам, основанным на параметризации распределений. В качестве иллюстративных примеров рассмотрим стохастические уравнения Дуффинга и Ковалевской.

Работа поддержана РФФИ (проект №10-07-00021) и Программой «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация (проект 1.7).

2. Распределения с инвариантной мерой в дифференциальных СтС с нормальными белыми шумами

Выделяя случаи невырожденной и вырожденной матрицы диффузии $\sigma = bvb^T$, приведем две теоремы существования одномерных и переходных плотностей распределений с инвариантной мерой стохастических режимов, являющихся сильным решением СДУ (1) и (2).

Теорема 1. *Функция* $f_1 = f_1(z;t)$, *будет решением (3), (4) тогда и только тогда, когда векторная функция* $a = a(z;t)$ *допускает представление*

$$a(z;t) = a_1^1(z,t) + a_2^1(z,t), \tag{8}$$

такое, что функция f_1 *является плотностью инвариантной меры обыкновенного дифференциального уравнения*

$$\dot{Z} = a_1^1(Z,t), \tag{9}$$

т.е. удовлетворяет условию

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + \frac{\partial^T}{\partial z}(a_1^1 f_1) = 0, \tag{10}$$

а составляющая $a_2^1 = a_2^1(z,t)$ *определяется формулой*

$$a_2^1(z,t) = \frac{1}{2}\left[\sigma \frac{\partial \ln f_1}{\partial z} + \left(\frac{\partial^T}{\partial z}\sigma\right)^T\right], \tag{11}$$

где a_1^1 *и* a_2^1 *определяются (9) и (11).*

Аналогично формулируется следующая теорема для переходной плотности стохастического режима.

Теорема 2. *Функция* $f = f(z;t \mid \zeta;\tau)$ *будет решением (5), (6) тогда и только тогда, когда векторная функция* $a = a(z;t)$ *допускает представление*

$$a(z;t) = a_1(z;t) + a_2(z;t), \tag{13}$$

такое, что функция f *является плотностью инвариантной меры обыкновенного дифференциального уравнения*

$$\dot{Z} = a_1(Z,t), \tag{14}$$

т.е. удовлетворяет условию

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial^T}{\partial z}(a_1 f) = 0, \tag{15}$$

а составляющая $a_2 = a_2^1(z,t)$ *определяется формулой*

$$a_2(z,t)=\frac{1}{2}\left[\sigma\frac{\partial\ln f_1}{\partial z}+\left(\frac{\partial^T}{\partial z}\sigma\right)^T\right],\qquad(16)$$

Замечание 1. В общем случае нахождение функций a_1^1, a_1, a_2^1, a_2, удовлетворяющих условиям теорем 1 и 2, такая же трудная задача, как и решение уравнений ФПК (3) и (5). В приложениях, например, в задачах механики, часто исходная функция $a(z,t)$ сразу может быть представлена в виде (8) и/или (13), где невозмущенные шумами уравнения (9) и (14) имеют интегральные инварианты или даже целые семейства. Отсюда вытекает конструктивный подход к нахождению одномерных и много мерных распределений. Для гладких функций a_1^1, a_1 вопросы существования и основные свойства интегральных инвариантов изучены [15, 16].

Рассмотрим случай невырожденной матрицы диффузии σ и найдем достаточные условия существования распределений с инвариантной мерой. Введем вспомогательную векторную функцию

$$\gamma_1=\gamma_1(z,t)=\sigma^{-1}\left\{a_2^1-\frac{1}{f_1}\left[\frac{\partial^T}{\partial z}(\sigma f_1)\right]^T\right\},\qquad(17)$$

удовлетворяющую условию отсутствия вихря

$$\frac{\partial\gamma_{1i}}{\partial z_j}=\frac{\partial\gamma_{1j}}{\partial z_i},\quad i,j=1,...k,\qquad(18)$$

и определим для нее скалярную функцию

$$F_1=F_1(z,t)=\int\gamma_1^T(z,t)dz.\qquad(19)$$

Следуя [15, 16], легко доказывается, что, если векторная функция (17) удовлетворяет условию (18), а скалярная функция (19) является первым интегралом (9), тогда для функции f_1, удовлетворяющей (3), (4), справедливо представление

$$f_1(z;t)=\mu_1(z,t)\exp F_1(z,t).\qquad(20)$$

Здесь $\mu_1=\mu_1(z,t)$ является плотностью интегрального инварианта (9), т.е. удовлетворяет условию (10) при $\mu_1(z,t)=f_1(z;t)$. Таким образом, если заранее известна плотность инвариантной меры невозмущенной системы, то для нахождения $f_1=f_1(z;t)$ имеем следующую теорему, дающую достаточные условия совпадения одномерной плотности СДУ (1) с плотностью инвариантной меры невозмущенного обыкновенного дифференциального уравнения (9).

Теорема 3. *Предположим, что для СДУ (1) известно представление векторной функции* $a(z,t)$ *в виде (8) и известна неотрицательная скалярная функция* $\mu_1=\mu_1(z,t)$, *являющаяся плотностью интегрального инварианта (9). Пусть, кроме того,*

1) *существует обратная матрица диффузии* σ^{-1}*;*
2) *векторная функция (17) удовлетворяет (18);*
3) *скалярная функция (19) является первым интегралом (9),*
4) *выполнено условие нормировки*

$$\int_{\Delta}\mu_1(z,t)\exp F_1(z,t)dz=1,\qquad(21)$$

Тогда существует стохастический режим $Z=Z(t)$, *для которого одномерная плотность* $f_1(z;t)$ *определяется формулой (20).*

Аналогично формулируется теорема для переходной плотности $f=f(z;t\,|\,\zeta,\tau)$.

Теорема 4. *Предположим, что для СДУ (1) известно представление векторной функции* $a(z,t)$ *в виде (13) и известна неотрицательная скалярная функция* $\mu=\mu(z,t,\zeta,\tau)$ *являю-*

щаяся плотностью интегрального инварианта (14). Пусть, кроме того,

1) *существует обратная матрица диффузии* σ^{-1};

2) *векторная функция*

$$\gamma = \gamma(z,t,\zeta,\tau) = \sigma^{-1}\left\{a_2^1 - \frac{1}{f}\left[\frac{\partial^T}{\partial z}(\sigma f)\right]^T\right\}, \tag{22}$$

удовлетворяет условию отсутствия вихря

$$\frac{\partial\gamma_i}{\partial z_j} = \frac{\partial\gamma_j}{\partial z_i}, \quad i,j = 1,\ldots,k; \tag{23}$$

3) *скалярная функция*

$$F = F(z,t,\zeta,\tau) = \int_{\Delta} \gamma^T(z,t,\zeta,\tau)dz. \tag{24}$$

является первым интегралом (14);

4) *выполнено условие нормировки*

$$\int_{\Delta_1} \mu(z,t,\zeta,\tau)\exp F(z,t,\zeta,\tau)dz = 1, \tag{25}$$

тогда существует стохастический режим $Z = Z(t)$, *для которого переходная плотность* $f(z;t\,|\,\zeta;\tau)$ *определяется формулой*

$$f(z;t\,|\,\zeta;\tau) = \mu(z,t,\zeta,\tau)\exp F(z,t,\zeta,\tau). \tag{26}$$

В тех случаях, когда для (9) известны плотности интегральных инвариантов и первые интегралы (или некоторые из них), получены необходимые и достаточные условия существования одномерных распределений с инвариантной мерой.

Теорема 5. *Функция* $\mu_1 = \mu_1(z,t)$, *являющаяся плотностью конечного интегрального инварианта (9), будет плотностью одномерного распределения стохастического режима* $Z = Z(t)$ *в СДУ (1) тогда и только тогда, когда существует матричная функция* $A_1 = A_1(z,t)$, *что*

1) $a_2^1\mu_1 = (\partial^T A_1 / \partial z)^T$; 2) $A_1 + A_1^T = \sigma\mu_1$, *где* $a_2^1 = a - a_1^1$.

Аналогично формулируется следующая теорема для переходной плотности $f = f(z;t\,|\,\zeta;\tau)$.

Теорема 6. *Функция* $\mu = \mu(z,t,\zeta,\tau)$, *являющаяся плотностью конечного интегрального инварианта (14), будет плотностью переходного распределения стохастического режима* $Z = Z(t)$ *в СДУ (1) тогда и только тогда, когда существует матричная функция* $A = A(z,t,\zeta,\tau)$, *что*

1) $a_2\mu = (\partial^T A / \partial z)^T$; 2) $A + A^T = \sigma\mu$, *где* $a_2 = a - a_1$.

3. Распределения с инвариантной мерой для случая вырожденной матрицы диффузии

Рассмотрим вырожденный класс СДУ (1), когда $Z = [X^T Y^T]^T$, причем

$$\begin{aligned} &\dot X = Q(X,Y,t),\\ &\dot Y = P(X,Y,t) + b_0(X,Y,t)V_0,\\ &X(t_0) = X_0, \quad Y(t_0) = Y_0. \end{aligned} \tag{27}$$

Здесь X и Y – s-мерные векторы, V_0 – r-мерный вектор нормально распределенных белых шумов с $r\times r$-матрицей интенсивностей $v_0 = v_0(t)$, $Q = Q(X,Y,t)$, $P = P(X,Y,t)$ и $b_0 = b_0(X,Y,t)$ – s- и $s\times r$-мерные детерминированные функции отмеченных аргументов,

X_0, Y_0 – нормально распределенные случайные величины.

В стационарном случае СДУ (27) принимают вид

$$\dot{X} = Q(X,Y),$$
$$\dot{Y} = P(X,Y) + b_0(X,Y)V_0, \tag{28}$$
$$X(t_0) = X_0, \quad Y(t_0) = Y_0 .$$

Для СДУ (27) матрица диффузии σ вырождена. В таком случае для $f_1 = \mu_1$, $f = \mu$ при невырожденной матрице $\sigma_0 = b_0 v_0 b_0^T$ и условиях:

$$f_1\ (x, y,; t_0) = f_0\ (x, y), \tag{29}$$
$$f(x, y; \tau \,|\, \zeta, \eta; \tau) = \delta(x-\xi)\delta(y-\eta), \tag{30}$$
$$P(x, y, t) = P_1^1 + P_2^1, \tag{31}$$
$$P(x, y, t) = P_1 + P_2, \tag{32}$$
$$\dot{X} = Q, \quad \dot{Y} = P_1^1, \tag{33}$$
$$\dot{X} = Q, \quad \dot{Y} = P_1, \tag{34}$$
$$P_2^1 = \frac{1}{2}\sigma_0 \frac{\partial \ln f_1}{\partial y}, \tag{35}$$
$$P_2 = \frac{1}{2}\sigma_0 \frac{\partial \ln f}{\partial y}, \tag{36}$$
$$\gamma_1 = \gamma_1(x, y, t) = \sigma_0^{-1} P_2^1, \quad \frac{\partial \gamma_{1i}}{\partial y_i} = \frac{\partial \gamma_{1j}}{\partial y_i}, \quad i, j = 1,\dots s, \tag{37}$$
$$\gamma = \gamma(x, y, t, \xi, \eta, \tau) = \sigma_0^{-1} P_2, \quad \frac{\partial \gamma_i}{\partial y_i} = \frac{\partial \gamma_j}{\partial y_i}, \quad i, j = 1,\dots s, \tag{38}$$
$$F_1 = F_1\ (x, y, t) = \int_{\Delta} \gamma_1^T dxdy, \tag{39}$$
$$F = F(x, y, t, \xi, \eta, \tau) = \int_{\Delta_1} \gamma^T dxdy, \tag{40}$$
$$f_1\ (x, y, t) = \mu_1(x, y, t) \exp F_1\ (x, y, t), \tag{41}$$
$$f(x, y; t \,|\, \xi, \eta, \tau) = \mu(x, y, t, \xi, \eta, \tau) \exp F(x, y, t, \xi, \eta, \tau), \tag{42}$$
$$\frac{\partial \mu_1}{\partial t} + \frac{\partial^T}{\partial x}(Q\mu_1) + \frac{\partial^T}{\partial y}(P_1^1 \mu_1) = 0, \tag{43}$$
$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \frac{\partial^T}{\partial x}(Q\mu) + \frac{\partial^T}{\partial y}(P_1\ \mu) = 0, \tag{44}$$
$$\int_{\Delta} \mu_1(x, y, t) \exp F_1(x, y, t) dxdy = 1, \tag{45}$$
$$\int_{\Delta_1} \mu(x, y, t, \xi, \eta, \tau) \exp F(x, y, t, \xi, \eta, \tau) dxdy = 1, \tag{46}$$

Получим следующие утверждения, соответствующие теоремам 1–6.

Теорема 7. *Функция* $f_1 = f_1\ (x, y; t)$ *будет решением (3), (29) тогда и только тогда, когда векторная функция* $P = P(x, y; t)$ *допускает представление (31) такое, что функция* f_1 *является плотностью инвариантной меры системы уравнений (33), т.е. удовлетворяет* *условию (43), а составляющая* $P_2^1 = P_2^1(x, y; t)$ *определяется формулой (35).*

Теорема 8. *Функция* $f = f(x, y, t \mid \xi, \eta, \tau)$ *будет решением (5), (30) тогда и только тогда, когда векторная функция* $P = P(x, \eta, t)$ *допускает представление (32) такое, что функция* f *является плотностью инвариантной меры системы уравнений (34), т.е. удовлетворяет условию (44), а составляющая* $P_2 = P_2(x, y, t)$ *определяется формулой (36).*

Теорема 9. *Предположим, что для СДУ (27) известно представление векторной функции* $P(x, y; t)$ *в виде (31) и известна неотрицательная скалярная функция* $\mu_1 = \mu_1(x, y, t)$*, являющаяся плотностью интегрального инварианта системы уравнений (33). Пусть кроме того,*

1) *существует обратная матрица диффузии* σ_0^{-1}*,*
2) *векторная функция* γ_1 *удовлетворяет (37),*
3) *скалярная функция (39) является первым интегралом (33),*
4) *выполнено условие нормировки (45),*

тогда существует стохастический режим $Z(t) = [X(t)^T Y(t)^T]^T$*, для которого одномерная плотность* $f_1(x, y, t)$ *определяется формулой (41).*

Теорема 10. *Предположим, что для СДУ (27) известно представление векторной функции* $P(x, y; t)$ *в виде (32) и известна неотрицательная скалярная функция* $\mu = \mu(x, y, t, \xi, \eta, \tau)$*, являющаяся плотностью интегрального инварианта системы уравнений (34). Пусть кроме того,*

1) *существует обратная матрица диффузии* σ_0^{-1}*,*
2) *векторная функция* γ *удовлетворяет (38),*
3) *скалярная функция (40) является первым интегралом (34),*
4) *выполнено условие нормировки (46),*

тогда существует стохастический режим $Z(t) = [X(t)^T Y(t)^T]^T$*, для которого одномерная плотность* $f_1(x, y, t \mid \xi, \eta, \tau)$ *определяется формулой (42).*

Теорема 11. *Функция* $\mu_1 = \mu_1(x, y, t)$*, являющаяся плотностью конечного интегрального инварианта (33),будет плотностью одномерного распределения стохастического режимам* $Z(t) = [X(t)^T Y(t)^T]^T$ *в СДУ (27) тогда и только тогда, когда существует матричная функция* $B_1 = B_1(x, y, t)$*, что* $P_2^1 \mu_1 = (\partial B_1 / \partial y)^T$*,* $B_1 + B_1^T = \sigma_0 \mu_1$*, где* $P_2^1 = P - P_1^1$*.*

Теорема 12. *Функция* $\mu = \mu(x, y, t, \xi, \eta, \tau)$*, являющаяся плотностью конечного интегрального инварианта (34),будет плотностью одномерного распределения стохастического режима* $Z(t) = [X(t)^T Y(t)^T]^T$ *в СДУ (27) тогда и только тогда, когда существует матричная функция* $B = B(x, y, t, \xi, \eta, \tau)$*, что* $P_2 \mu_1 = (\partial B_1 / \partial y)^T$*,* $B_1 + B_1^T = \sigma_0 \mu$*, где* $P_2 = P - P_1$ *.*

Замечание 2. Основные теоремы раздела 3 переносятся на случай, когда во втором уравнении (27) вместо белого шума V_0 стоит стохастическое возмущение U, связанное с белым шумом, линейным по U уравнением формирующего фильтра [1, 2].

4. Стационарные распределения

Условия существования одномерных стационарных в узком смысле распределений режимов в СДУ (2) устанавливаются теоремами 1, 3, 5, а в СДУ (28) – теоремами 7, 9, 11 при $\partial \mu_1 / \partial t = 0$. При этом, для определения переходных плотностей f и μ используются теоремы 2, 4, 6 и теоремы 8, 10, 12.

Для случая автокоррелированных шумов стационарные распределения с инвариантной мерой определяются следующими двумя утверждениями.

Теорема 13. *Пусть система описывается СДУ вида*

$$\dot{X}=\frac{\partial H}{\partial Y},\quad \dot{Y}=-\frac{\partial H}{\partial X}+b_0(X)U, \tag{47}$$

$$\dot{U}=-\frac{\partial^T H}{\partial Y}b_0(X)\xi^{-1}-DX+b_U V. \tag{48}$$

где $H=H(X,Y)$ *– функция Гамильтона,* D *– постоянный матричный коэффициент демпфирования;* b_U *– постоянный матричный коэффициент;* ξ *– постоянная матрица для* $\varepsilon>0$ *удовлетворяющая условию*

$$\xi D+D^T\xi=\varepsilon\xi\nu\xi^T, \tag{49}$$

ν *– интенсивность белого шума* V. *Тогда система допускает стационарное в узком смысле решение с одномерной плотностью вида*

$$f_1\,(x,y)=ce^{-\varepsilon H^*(x,y)}, \tag{50}$$

$$H^*(x,y)=H(x,y)+\frac{1}{2}U^T\xi U. \tag{51}$$

Теорема 14. *Пусть стохастическая система описывается СДУ вида*

$$\dot{X}=Q(X,Y),\quad \dot{Y}=P(X,Y)+b_0(X,Y)U, \tag{52}$$

$$\dot{U}=-Q^T(X,Y)b_0(X)\xi^{-1}-DX+b_U V, \tag{53}$$

где ξ *– постоянная матрица, удовлетворяющая условию (49),* D *– матричный коэффициент демпфировании;* b_U *– постоянный матричный коэффициент. Тогда система допускает стационарное в узком смысле решение с одномерной плотностью*

$$f_1\,(x,y)=\mu(x)e^{-\varepsilon H^*(x,y)}, \tag{54}$$

где $\mu(x)$ *– стационарная плотность интегрального инварианта.*

5. Приближенные методы аналитического моделирования, основанные на параметризации распределений

В основе метода нормальной аппроксимации (МНА) одно- и двумерных распределений стохастических режимов в (1) (одного из широко используемых методов аналитического моделирования) лежит следующее утверждение.

Теорема 15. *Пусть система, описывается СДУ (1), и допускает применение МНА. Тогда уравнения МНА имеют следующий вид:*

$$f_1^N(z,t,m_t,K_t)=\left[(2\pi)^k\,|K_t|\right]^{-1/2}\exp\left\{-\frac{1}{2}(z^T-m_t^T)K_t^{-1}(z-m_t)\right\}, \tag{55}$$

$$\frac{\partial f_1^N(z,t,m_t,K_t)}{\partial t}+\frac{\partial^T}{\partial z}(a(z,t)\,f_1^N(z,t,m_t,K_t))=O, \tag{56}$$

$$\dot{m}_t=a_1(m_t,K_t,t)=\int_{-\infty}^{\infty}a(z,t)\,f_1^N(z,t,m_t,K_t)dz, \tag{57}$$

$$\dot{K}_t=a_2(m_t,K_t,t)=\int_{-\infty}^{\infty}[a(z,t)(z^T-m_t^T)+(z-m_t)a^T(z,t)+\sigma(z,t)]f_1^N(z,t,m_t,K_t)dz, \tag{58}$$

$$\sigma(z,t)=b(z,t)\nu(t)b(z,t)^T,$$

$$\frac{\partial K(t_1,t_2)}{\partial t_2}=a_3(m_{t_1},m_{t_2},K(t_1,t_2))=\left[(2\pi)^{2k}\,|K_2|\right]^{-1/2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}(z_1-m_{t_1})a(z_{t_2},t_2)\times$$

$$\times\exp\left\{-([z_1^T z_2^T]-\overline{m}_2^T)\overline{K}_2^{-1}([z_1^T z_2^T]-\overline{m}_2)\right\}dz_1\,dz_2, \tag{59}$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\overline{m}_2=[m_{t_1}^T,m_{t_2}^T]^T,\quad \overline{K}_2=\begin{bmatrix}K(t_1,t_1) & K(t_1,t_2)\\ K(t_2,t_\cdot) & K(t_2,t_2)\end{bmatrix}.$$

Для стационарной системы (2) уравнения для $m_t = m^* = const,\ K_t = K^* = const$ получаются из (57), (58) при условиях $\dot m_t = 0, \dot K_t = 0$, $\partial f_1^N / \partial t = 0$:

$$a_1(m^*, K^*) = 0, \quad a_2(m^*, K^*) = 0, \quad \partial^T / \partial z (a(z) f_1^N(z; m^*, K^*)) = 0. \tag{60}$$

Замечание 3. Теорема 15 может быть использована для системы (1), в которой вместо белого шума V стоит автокоррелированный процесс, связанный с белым шумом уравнением формирующего фильтра (ФФ). Путем расширения вектора состояния $\overline{Z} = [Z^T \overline{U}^T]^T$ ($\overline{U}$ – вектор переменных ФФ) СДУ сводится к СДУ вида (1) для $\overline{Z}$.

Аналогично обобщаются другие известные методы параметризации распределений (методы и моментов, семиинвариантов и квазимоментов, методы ортогональных разложений, методы эллипсоидальной аппроксимации и линеаризации [1, 2]).

Примеры применения точных и приближенных методов в статистической динамике тела и системы тел, а также информационно-измерительных и информационно-управляющих систем даны в [3-14, 17-20]. В [21, 22] уравнения (55)-(60) обобщены на случай одно- и многомерных круговых стохастических систем в том числе с инвариантной мерой.

6. Стохастическое уравнение Дуффинга

Как известно [23], уравнение Дуффинга

$$\ddot X + \omega^2 X - \mu X^3 = 0, \quad X(t_0) = X_0, \quad \dot X(t_0) = \dot X_0, \tag{61}$$

допускает следующий общий интеграл:

$$X = C\,\mathrm{sn}[k_1(t+h), k]. \tag{62}$$

Здесь $\mathrm{sn}(u,k)$ – эллиптический синус, C, k_1, k – постоянные, связанные между собой формулами

$$k_1^2(1+k^2) = \omega^2, \quad \frac{2k_1^2 k^2}{C^2} = \mu, \tag{63}$$

а постоянная h зависит от выбора начальный условий.

Интеграл (62) описывает как периодические неизохронные колебания, так и апериодические движения по сепаратрисе соответственно при условиях [23]:

$$l^2 < l_{\text{кр}}^2 \text{ и } l^2 > l_{\text{кр}}^2 \ \ (l_{\text{кр}}^2 = \omega^2 / 4\mu, \quad l = \dot X_0^2 \mu / \omega^4.$$

Уравнение (61) допускают интеграл энергии, а следовательно имеют конечный интегральный инвариант.

Теперь рассмотрим стохастическое уравнение Дуффинга:

$$\ddot X + \omega^2 X - \mu X^3 + \delta \dot X = U + V, \quad X(t_0) = X_0, \quad \dot X(t_0) = \dot X_0, \tag{64}$$

где $\delta > 0$ – коэффициент демпфирования; V – нормальный стационарный белый шум интенсивности v, $U = const$. Если учесть, что система (61) при $U = 0$ допускает интеграл энергии вида:

$$H(\dot X, X) = \frac{1}{2}\dot X^2 + \Pi(X) = const, \quad \Pi(X) = \frac{\omega^2 X^2}{2} - \frac{\mu X^4}{4}, \tag{65}$$

то в соответствии с разделом 3 плотность интегрального определяется формулой Гиббса:

$$f_1(x, \dot x) = C \exp\left[-\frac{2\delta}{v} H(x, \dot x)\right]. \tag{66}$$

Отсюда следует, что колебания по координате X и скорости $\dot X$ статистически независимы. Распределение по скорости $\dot X$ – гауссово, а по координате негауссово.

Уравнения МНА для (64) при $U \neq 0$, если провести статистическую линеаризацию кубической функции по формуле [1, 2]:

$$X^3 \approx m_X(m_X^2 + 3D_X) + 3(m_X^2 + D_X)X^0,$$

имеют следующий вид:

$$\dot{m}_X = 2m_{\dot{X}}, \quad \dot{m}_{\dot{X}} = U - \omega_э^2 m_X - \delta m_{\dot{X}}, \tag{67}$$

$$\dot{D}_X = 2K_{X\dot{X}}, \quad \dot{D}_{\dot{X}} = v - 2(\omega_{1э}^2 K_{X\dot{X}} + \delta D_{\dot{X}}), \quad \dot{K}_{X\dot{X}} = D_{\dot{X}} - \omega_{1э}^2 D_X - \delta K_{\dot{X}\dot{X}}. \tag{68}$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\omega_э^2 = \omega^2\left[1 - \frac{\mu(m_X^2 + 3D_X)}{\omega^2}\right], \quad \omega_{1э}^2 = \omega^2\left[1 - \frac{3\mu(m_X^2 + D_X)}{\omega^2}\right] \quad (\omega_э > \omega_{1э}). \tag{69}$$

Уравнения (67) и (68) при $U = 0$ позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, в стационарном режиме $m_X^* = 0, m_{\dot{X}}^* = 0, K_{X\dot{X}}^* = 0$, а D_X^* и $D_{\dot{X}}^*$ определяются путем совместного решения уравнений

$$-2\delta D_{\dot{X}}^* + v = 0, \quad D_{\dot{X}}^* - \omega_{1э}^2(D_X^*)D_X^* = 0. \tag{70}$$

Таким образом, МНА для D_X^* дает решение, совпадающее с точным (на основе (66)). Приближенное решение для D_X правильно отражает качественную картину, причем при больших $l_{кр}$ погрешность аналитического моделирования не превосходит 30%. Во-вторых, процесс установления происходит в два этапа: сначала на интервале $D_{\dot{X}}$, а затем только устанавливается D_X.

При малых μ приближенное выражение для (66) методом эллипсоидальной аппроксимации получено в [24].

7. Стохастические уравнения Ковалевской

Уравнения движения тяжелого тела с неподвижной точкой в стохастической среде при произвольной геометрии масс приведены в [17]. Отсюда в случае С.В.Ковалевской [25] они имеют вид для переменных $z^1 = [z_1 z_2 z_3]^T$:

$$\dot{z}_1 = \frac{1}{2}z_2 z_3 - \varepsilon_1 z_1 + V_1, \quad \dot{z}_2 = -\frac{1}{2}z_1 z_3 + \frac{1}{2}\omega z_6 - \varepsilon_2 z_2 + V_2, \quad \dot{z}_3 = -\omega z_5 - \varepsilon_3 z_3 + V_3 \tag{71}$$

и переменных $z^1 = [z_4 z_5 z_6]^T$

$$\dot{z}_4 = z_3 z_5 - z_2 z_6, \quad \dot{z}_5 = z_1 z_6 - z_3 z_4, \quad \dot{z}_6 = z_2 z_4 - z_1 z_5. \tag{72}$$

Здесь $\omega, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – коэффициенты удельных моментов сил тяжести и вязкого трения; $V = [V_1 V_2 V_3]^T$, где V_1, V_2, V_3 – гауссовы белые шумы с интенсивностями $v = [v_{ij}] \quad (i, j = 1,2,3)$.

Уравнения (71), (72) при отсутствии возмущений со стороны стохастической среды, но со случайными начальными условиями, допускают следующие 4 первых интеграла:

$$2I_1 = 2(Z_1^2 + Z_2^2) + Z_3^2 + 2\omega Z_4, \quad 2I_2 = 2(Z_1 Z_4 + Z_2 Z_5) + Z_3 Z_6,$$

$$I_3^2 = (Z_1^2 - Z_2^2 - \omega Z_4)^2 + (2Z_1 Z_2 - \omega Z_5)^2, \quad I_4 = 1 = Z_4^2 + Z_5^2 + Z_6^2.$$

Общий интеграл (71), (72) выражается через гиперэллиптические функции [25].

Распределения интегралов $I_1, ..., I_4$ при заданном начальном распределении $Z_0 = [Z_{10} ... Z_{60}]^T$ находятся по формулам нахождения нелинейных функций случайного аргумента [1, 2].

Стационарные стохастические режимы в (71), (72) изучены в [17]. Изучим процессы их установления, пользуясь МНА. Проведем статистическую линеаризацию нелинейных функций $Z_i Z_j$ по формулам [1, 2]:

$$Z_i Z_j \approx m_i m_j + K_{ij} + m_j X_i^0 + m_i X_j^0 \quad (X_i^0 = X_i - m_i).$$

Тогда, для $m_t = [m_t^{1T} m_t^{2T}]^T$,

$$K_t = \begin{bmatrix} K_1^{11} & K_1^{12} \\ K_1^{21} & K_1^{22} \end{bmatrix}, \quad K_t^{11} = \begin{bmatrix} K_{11}^{11} & K_{12}^{11} & K_{13}^{11} \\ K_{12}^{11} & K_{22}^{11} & K_{23}^{11} \\ K_{13}^{11} & K_{23}^{11} & K_{33}^{11} \end{bmatrix}, \quad K_t^{22} = \begin{bmatrix} K_{44}^{22} & K_{45}^{22} & K_{46}^{22} \\ K_{45}^{22} & K_{55}^{22} & K_{56}^{22} \\ K_{46}^{22} & K_{56}^{22} & K_{66}^{22} \end{bmatrix},$$

$$K_t^{12} = \begin{bmatrix} K_{14}^{12} & K_{15}^{12} & K_{16}^{12} \\ K_{24}^{12} & K_{25}^{12} & K_{26}^{12} \\ K_{34}^{12} & K_{35}^{12} & K_{36}^{12} \end{bmatrix}, \quad K_t^{21} = \begin{bmatrix} K_{41}^{21} & K_{42}^{21} & K_{33}^{21} \\ K_{51}^{21} & K_{52}^{21} & K_{53}^{21} \\ K_{61}^{21} & K_{62}^{21} & K_{63}^{21} \end{bmatrix},$$

получим согласно (57) и (58) следующие детерминированные векторно-матричные уравнения:

$$[\dot{m}_t^1] = [a_1^1], \quad [\dot{m}_t^2] = [a_1^2], \tag{73}$$

$$[\dot{K}_t^{11}] = [a_2^{11}], \quad [\dot{K}_t^{12}] = [a_2^{12}], \quad [\dot{K}_t^{22}] = [a_2^{22}], \quad [\dot{K}_t^{21}] = [a_2^{21}]. \tag{74}$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$a_1 = \begin{bmatrix} [a_1^1] \\ [a_1^2] \end{bmatrix}, \quad [a_1^1] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(m_2 m_3 + K_{23}) - \varepsilon_1 m_1 \\ -\frac{1}{2}(m_1 m_3 + K_{13}) + \frac{\omega}{2} m_6 - \varepsilon_2 m_2 \\ -\omega m_5 - \varepsilon_3 m_3 \end{bmatrix},$$

$$[a_1^2] = \begin{bmatrix} m_3 m_5 - m_2 m_6 + K_{35} - K_{26} \\ m_1 m_6 - m_3 m_4 + K_{16} - K_{34} \\ m_2 m_4 - m_1 m_5 + K_{24} - K_{15} \end{bmatrix}, \quad a_2 = \alpha K_t + K_t \alpha^T + \beta v \beta^T = \begin{bmatrix} [a_2^{11}] & [a_2^{12}] \\ [a_2^{21}] & [a_2^{22}] \end{bmatrix},$$

$$[a_2^{11}] = [\alpha_{11}][K_t^{11}] + [\alpha_{12}][K_t^{21}] + [K_t^{11}][\alpha_{11}]^T + [K_t^{12}][\alpha_{12}]^T + [v],$$

$$[a_2^{22}] = [\alpha_{21}][K_t^{12}] + [\alpha_{22}][K_t^{22}] - [K_t^{21}][\alpha_{21}] - [K_t^{22}][\alpha_{22}],$$

$$[a_2^{12}] = [\alpha_{11}][K_t^{12}] + [\alpha_{12}][K_t^{22}] - [K_t^{11}][\alpha_{21}] - [K_t^{12}][\alpha_{22}],$$

$$[a_2^{21}] = [\alpha_{21}][K_t^{11}] + [\alpha_{22}][K_t^{21}] + [K_t^{21}][\alpha_{11}]^T + [K_t^{22}][\alpha_{12}]^T,$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} [\alpha_{11}] & [\alpha_{12}] \\ [\alpha_{21}] & [\alpha_{22}] \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} E_3 \\ O_3 \end{bmatrix},$$

$$[\alpha_{11}] = \begin{bmatrix} -\varepsilon_1 & m_3/2 & m_2/2 \\ -m_1/2 & -\varepsilon_2 & -m_1/2 \\ 0 & 0 & -\varepsilon_3 \end{bmatrix}, \quad [\alpha_{12}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega/2 \\ 0 & -\omega & 0 \end{bmatrix},$$

$$[\alpha_{21}] = -[\alpha_{21}]^T = \begin{bmatrix} 0 & -m_6 & m_5 \\ m_6 & 0 & -m_4 \\ -m_5 & m_4 & 0 \end{bmatrix}, \quad [\alpha_{22}] = -[\alpha_{22}]^T = \begin{bmatrix} 0 & m_3 & -m_2 \\ -m_3 & 0 & m_1 \\ m_2 & -m_1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad O_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [v] = \begin{bmatrix} v & O_3 \\ O_3 & O_3 \end{bmatrix}.$$

Для изотронной стационарной вибрации: $\varepsilon_1 / v_2 = \varepsilon_2 / v_2 = \varepsilon_3 / v_3 = \theta$ точное решение дается формулой Гиббса:

$$f_1(z^1, z^2) = C\exp[-\theta H(z^1, z^2)], \quad H(z^1, z^2) = T + \Pi = C\left\{(z_1^2 + z_2^2) + \frac{z_3^2}{2} + \omega z_4\right\}. \tag{75}$$

Это распределение гауссово (максвелово) по группе переменных $z^1 = [z_1 z_2 z_3]^T$ и зависит только от переменной z_4. Точное решение по переменным z^1 совпадает с приближенным решением, получаемого из первого уравнения (74). Второе, третье и четвертое уравнения (24) позволяют найти $K_{44}^* = D_4^*$, а также убедиться в отсутствии корреляционной связи между группами переменных z^1 и z^2. Уравнения (73) и (74) позволяют численно моделировать различные стохастические режимы при переменных параметрах тела и стохастической среды, в частности, для анизотропной стохастической среды $(v_1 \neq v_2 \neq v_3, \varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq \varepsilon_3)$, а также при плоско $(v_1 = v_2 \neq v_3, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \neq \varepsilon_3)$ и линейно $(v_1 = v_2, v_3 \neq 0, \varepsilon_1 = \varepsilon_2, \varepsilon_3 \neq 0)$ поляризованной среды.

8. Обсуждение результатов. Сопоставим методам аналитического моделирования, основанные на теоремах 3-6 и 10-12. Во всех этих методах одномерные и переходные плотности совпадают с плотностями интегральных инвариантов невозмущенных уравнений (9), (14) и (33), (34). Однако, методы, базирующиеся на теоремах 3, 4 и 9, 10 удобнее использовать там, где у невозмущенной системы заранее неизвестны первые интегралы, а известна только плотность интегрального инварианта (не обязательно конечного). В тех случаях, когда у невозмущенных уравнений (9), (14) и (33), (34) известны плотности интегральных инвариантов и некоторые (или все) ее первые интегралы, удобнее использовать методы, основанные на теоремах 5, 6 и 11, 12. Теоремы 13 и 14 удобно использовать только тогда, когда известны плотности интегральных инвариантов и первые интегралы.

Теоремы 1-14 могут быть использованы для решения вопросов эквивалентности различных типов СДУ и стохастических режимов в них. В частности, удалось найти точные одно- и многомерные распределения в нелинейных СДУ приводимых к линейным, а также в СДУ, для которых a и Q, P линейны по z и x, y, а $\sigma = bvb^T$ и $\sigma_0 = b_0 v b_0^T$ зависят только от времени, $\sigma = \sigma(t)$ и $\sigma_0 = \sigma_0(t)$

Теоремы 1-14 лежат в основе новых методов аналитического моделирования точных одно- и многомерных распределений стохастических режимов в линейных и нелинейных СДУ, а теорема 15 – для приближенного аналитического моделирования многомерных стохастических систем с инвариантной мерой методом нормальной аппроксимации.

Библиографический список использованных источников

1. Пугачев В.С. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация – 2-е изд., доп / В.С.Пугачев, И.Н. Синицын; – М.: Наука, – 1990.

2. Пугачев В.С. Теория стохастических систем – 2-е изд. / В.С.Пугачев, И.Н. Синицын; – М.: Логос, – 2004.

3. Moshchuk N.K.. On stationary distributions in nonlinear stochastic differential systems / N.K.Moshchuk, I.N.Sinitsyn; Preprint. Mathematics Institute, University of Warwick Coventry. CV4 7 AL.UK, – 1989. – 15p.

4. Moshchuk N.K. On stochastic nonholonomic systems / N.K.Moshchuk, I.N.Sinitsyn // Preprint. Mathematics Institute, University of Warwick Coventry. CV4 7AL.UK., – 1989. – 32p.

5. Мощук Н.К. О стохастических неголономных системах / Н.К.Мощук, И.Н.Синицын // Прикладная механика и математика, – 1990. – Т.54. – Вып.2. – С.213-223.

6. Мощук Н.К. О стохастических распределениях в нелинейных голономных и неголономных стохастических системах / Н.К. Мощук, И.Н. Синицын // Тез. докл. респ. конф. «Динамика твердого тела». – Донецк: Институт прикладной механика АН УССР, – 1990. – С.41.

7. Moshchuk N.K. On stationary distributions in nonlinear stochastic differential systems / N.K.Moshchuk, I.N.Sinitsyn // Quart. J. Mech. Appl. Math. – 1991. – Vol.44. – Pt.4.– P.571-579.

8. Мощук Н.К. О стационарных и приводимых к стационарным режимах в нормальных стохастических системах / Н.К. Мощук, И.Н. Синицын // Прикладная механика и математика. – 1991. – Т.55. – Вып.6. – С.895-903.

9. Мощук Н.К. Распределение с инвариантной мерой в механических стохастических

нормальных системах / Н.К. Мощук, И.Н. Синицын // Докл. АН СССР. – 1992 – Т.322. – №4. – С.662-667.

10. Sinitsyn I.N. Lectures on PC-based nonlinear stochastic mechanical systems research. Uĉebni Texty úsnavu Termomechaniky / I.N. Sinitsyn. – Praha: ČAV, – 1992. – 63 p.

11. Синицын И.Н. Конечномерные распределения с инвариантной мерой в стохастических механических системах / И.Н. Синицын // Докл. РАН. – 1993. – Т.328. – №3. – С.308-310.

12. Синицын И.Н. Конечномерные распределения с инвариантной мерой в стохастических нелинейных дифференциальных системах / И.Н. Синицын // Диалог МГУ – М.: – 1997. – С.129–140.

13. Синицын И.Н. Точные методы расчета стационарных режимов с инвариантной мерой в стохастических системах управления / И.Н. Синицын, Э.Р. Корепанов, В.В. Белоусов // Тр. II Междунар. науч.-технич. конф. «Кибернетика и технологии XXI века» C&T'2002. – Воронеж: НПФ «Саквое», – 2002. – С.124-131.

14. Синицын И.Н. Точные аналитические методы в статистической динамике нелинейных информационно-управляющих систем / И.Н. Синицын, Э.Р. Корепанов, В.В. Белоусов // Системы и средства информатики. Спец. вып. Математическое и алгоритмическое обеспечение информационно-телекоммуникационных систем: – М.: Наука. – 2002. – С.112-121.

15. Немыцкий В.В. Качественная теория дифференциальных уравнений / В.В. Немыцкий, В.В. Степанов. – М.; Л.: Гостехиздат, – 1949.

16. Козлов В.В. О существовании интегрального инварианта гладких динамических систем / В.В.Козлов // ПММ. – 1987. – №1. – С.538-545.

17. Мощук Н.К. Стационарные флуктуации тяжелого твердого тела с неподвижной точкой в случайной среде / Н.К. Мощук, И.Н. Синицын // Докл. АН СССР, – 1991. – Т.320. – №6. – С.1337–1339.

18. Мощук Н.К. О флуктуациях в случайной среде тела с неподвижной точкой / Н.К. Мощук, И.Н. Синицын // Механика твердого тела. – 1993. – №1. –С.47–52.

19. Синицын И.Н. О стационарных флуктуациях уравновешенных гиростатов / И.Н. Синицын, С.А. Матюхин // Докл. РАН. – 1996. – Т.354. – №2. –С.1-4.

20. Синицын И.Н. Стационарные флуктуации системы твердых тел, соединенных неголономными связями / И.Н. Синицын, С.А. Матюхин // Механика твердого тела. – 1996. – №5. – С.5-12.

21. Синицын И.Н. Математическое обеспечение для анализа нелинейных многоканальных круговых стохастических систем, основанное на параметризации распределений / И.Н. Синицын, Э.Р. Корепанов, В.В. Белоусов, Т.Д. Конашенкова // Информатика и ее применения. – 2012. – Вып.1. – С.11-17.

22. Синицын И.Н. Развитие математического обеспечения для анализа нелинейных многоканальных круговых стохастических систем / И.Н. Синицын // Системы и средства информатики. – 2012. – Т.22. – Вып.1. – С.3-21.

23. Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики (2-е изд.) / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981.

24. Синицин В.И. Методы эллипсоидальной аппроксимации распределений в задачах нелинейного анализа и оперативной обработки информации в стохастических системах / В.И. Синицин // Диссертационная работа на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – М.: МАИ, – 2006.

25. Козлов В.В. Методы качественного анализа в динамике твердого тела / В.В. Козлов. – М.: Изд. Моск. ун-та, – 1980.

УДК 004.03; +530.1

И.М. Гуревич, канд. техн. наук
Институт проблем информатики РАН, ООО «ГЕТНЕТ Консалтинг», г. Москва, Россия
iggurevich@gmail.com

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ И СВОЙСТВА ПРИРОДЫ КАК СЛЕДСТВИЕ ЗАКОНОВ ИНФОРМАТИКИ

В статье реализуется информационный подход к исследованию физических систем описанный в основополагающих работах А.Д.Урсула [1, настоящий сборник]. Показано, что знание информационных законов природы (законов информатики) позволяет разрабатывать и применять информационные методы исследования физических систем и Вселенной в целом, в частности вывести основные физические законы. Приведем основные информационные законы природы (законы информатики) [2-8]:

Закон простоты сложных систем. Реализуется, выживает, отбирается тот вариант сложной системы, который обладает наименьшей сложностью. Закон простоты сложных систем реализуется природой в ряде конструктивных принципов: «бритва Оккама»; иерархического модульного построения сложных систем; симметрии; симморфоза (равнопрочности, однородности); устойчивости; полевого взаимодействия (взаимодействия через носитель или взаимодействия через состояние пространства-времени, например, кривизну пространства-времени); экстремальной неопределенности (функции распределения характеристик, параметров, имеющих неопределенные значения, имеют экстремальную неопределенность).

Важной реализацией закона простоты сложных систем является:

Закон сохранения неопределенности (информации). Неопределенность (информация) изолированной (замкнутой) системы сохраняется при физически реализуемых преобразованиях и только при физически реализуемых преобразованиях.

Закон конечности информационных характеристик сложных систем. Все виды взаимодействия между системами, их частями и элементами имеют конечную скорость распространения. Ограничена также скорость изменения состояний элементов системы. В любой системе координат информация о событии всегда конечна. Длительность сигнала ΔT всегда больше нуля ($\Delta T > 0$). Информация о координатах физических систем в нашем мире ограничена 333 битами.

Закон необходимого разнообразия Эшби. Для эффективного функционирования системы разнообразие управляющего органа должно быть не менее разнообразия объекта управления.

Отметим, что неопределенность (информация) является основной характеристикой разнообразия системы. Закон необходимого разнообразия Эшби также реализуется в ряде конкретных принципов: теоремы Шеннона, теорема Котельникова, теорема Холево, теорема Брюллиена, теорема Марголиса–Левитина.

Теорема Геделя о неполноте. В достаточно богатых теориях (включающих арифметику) всегда существуют недоказуемые истинные выражения.

Следующие законы определяют изменения сложности систем.

Закон роста сложности систем. В ходе эволюции системы ее неопределенность (информация в системе) растет.

Закон Онсагера максимизации убывания энтропии. Если число всевозможных форм реализации процесса, не единственно, то реализуется та форма, при которой энтропия системы растет наиболее быстро. Иначе говоря, реализуется та форма, при которой максимизируется убывание энтропии или рост информации, содержащейся в системе.

Принцип ле Шателье. Внешнее воздействие, выводящее систему из равновесия, вызывает в ней процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия.

Физические законы и свойства Вселенной – следствие информационных законов природы (законов информатики)

Законы информатики определяют физические законы и свойства Вселенной, в частности, накладывают ограничения на размерность пространства-времени, физические преобразования пространства-времени и преобразования внутренней симметрии. Изложение осуществляется в форме утверждений.

Строение Вселенной

Утверждение. Вселенная устроена наиболее простым образом. Описание (теоретическая модель) Вселенной должна быть наиболее простой.

Утверждение. *Вселенная представляет собой иерархическую совокупность физических систем.*

Классическая и квантовая физика

Утверждение. Аксиомы классической и квантовой физики могут быть сформулированы на классическом языке.

Классическая логика — термин, используемый в математической логике по отношению к той или иной логической системе, для указания того, что для данной логики справедливы все законы (классического) исчисления высказываний, в том числе закон исключения третьего. Множество аксиом классической и квантовой физики ограничено и непротиворечиво. Среди них отсутствуют недоказуемые истинные утверждения.

Утверждение. Все утверждения о физических системах не могут быть сформулированы на классическом языке. Для формулировки утверждений о физических системах должен использоваться язык квантовой физики.

В силу теоремы Геделя физика не может ограничиться классическими теориями, в рамках которых всегда существуют недоказуемые истинные выражения, что объясняется потенциально неограниченным числом утверждений о физических системах. Это объясняет обязательное существование квантовой физики, описывающей физические системы вероятностными характеристиками.

Утверждение. Применение принципа максимальной информационной энтропии при ограничениях на сумму вероятностей путей (=1) и среднее действие позволяет получить распределение вероятностей путей, статистическую сумму, среднее действие и волновую функцию пути [9].

Утверждение. Сочетание классического сложения вероятностей различимых альтернатив с классическим выбором одного из нескольких равновероятных путей приводит к квантовомеханическому волновому правилу сложения амплитуд [4].

Описание физических систем

Утверждение. Физические системы, объекты, наблюдаемые описываются волновой функцией или амплитудой вероятности, содержащими в качестве параметров и переменных физические характеристики.

Утверждение. Квадрат модуля волновой функции или амплитуды вероятности есть плотность вероятности или вероятность.

Утверждение. Физические системы, объекты, наблюдаемые описываются информационной характеристикой – неопределенностью (информацией). Мерой неопределенности (информации) является информационная энтропия Шеннона, определяемой как функционал на волновой функции или амплитудах вероятности [10].

Утверждение. Неоднородности физической системы описываются информационной характеристикой – дивергенцией, определяемой как функционал на волновой функции или амплитудах вероятности [6-7].

Утверждение. Унитарные преобразования описываются информационной характеристикой – совместной энтропией [4].

Утверждение. Взаимодействие (запутанность, сцепленность) физических систем, объектов описывается информационной характеристикой – информацией связи[4].

Информационные ограничения на физические преобразования

Утверждение. Преобразования U состояний $\left|\psi\right\rangle = \sum_x c_x \left|x\right\rangle$ в комплексном евклидовом пространстве, сохраняющие вероятностную структуру состояний (сумма вероятностей полученных при измерении одного из базисных состояний x для исходного состояния $\left|\psi\right\rangle = \sum_x c_x \left|x\right\rangle$ равна единице $\left\langle\left|\psi\right\rangle\left\|\psi\right\rangle\right\rangle = \sum_x \left|c_x\right|^2 = 1$, и сумма вероятностей полученных при измерении одного из базисных состояний x для конечного состояния $U\left|\psi\right\rangle = U\sum_x c_x\left|x\right\rangle = \sum_x c_{ux}\left|x\right\rangle$ равна единице $\left\langle\left|U\psi\right\rangle\left\|U\psi\right\rangle\right\rangle = \sum_x \left|c_{ux}\right|^2 = 1$), являются унитарными [11-15].

Утверждение. Преобразования O состояний $\left|\psi\right\rangle = \sum_x c_x \left|x\right\rangle$ в действительном евклидовом пространстве, сохраняющие вероятностную структуру состояний (сумма вероятностей получения при измерении одного из базисных состояний x для исходного состояния $\left|\psi\right\rangle = \sum_x c_x \left|x\right\rangle$ равна единице $\left\langle\left|\psi\right\rangle\left\|\psi\right\rangle\right\rangle = \sum_x \left|c_x\right|^2 = 1$, и сумма вероятностей получения при измерении одного из базисных состояний x для конечного состояния $O\left|\psi\right\rangle = O\sum_x c_x\left|x\right\rangle = \sum_x c_{ox}\left|x\right\rangle$ равна единице $\left\langle\left|O\psi\right\rangle\left\|O\psi\right\rangle\right\rangle = \sum_x \left|c_{ox}\right|^2 = 1$), являются ортогональными [11-15].

Утверждение. Трансляционные преобразования являются наиболее простыми.

Утверждение. Линейные преобразования координат, как и трансляционные, являются наиболее простыми преобразованиями.

Утверждение. Действительные переменные являются наиболее простыми.

Утверждение. Во Вселенной действуют трансляционные и линейные преобразования координат как наиболее простые.

Утверждение. Наблюдаемые являются действительными величинами как наиболее простыми.

Утверждение. При преобразованиях систем координат неопределенность (информация) сохраняется в том и только в том случае, когда значение якобиана преобразования равно единице $J(\frac{x_1,\dots,x_n}{y_1,\dots,y_n}) = 1$ [2-7].

В дальнейшем будем рассматривать линейные преобразования координат как наиболее простые $y = Ax$ или $y = \left\|a_{ij}\right\| x$.

Утверждение. Неопределенность (информация) сохраняется в том и только в том случае, когда значение определителя линейного преобразования координат равно единице.

Утверждение. При глобальных калибровочных преобразованиях [18-20] $\psi'(x) = e^{i\alpha}\psi'(x)$, $\alpha = const$ неопределенность (информация) сохраняется.

Оценим $\overline{\psi}'(x)\psi'(x) = e^{-i\alpha}\overline{\psi}(x)e^{i\alpha}\psi(x) = e^{-i\alpha}e^{i\alpha}\overline{\psi}(x)\psi(x) = \overline{\psi}(x)\psi(x)$. ($e^{-i\alpha}$ и $\overline{\psi}(x)$ - как комплексные числа коммутируют). Следовательно, $-\int\left|\psi'(x)\right|^2 \log_2\left|\psi'(x)\right|^2 dx = -\int\left|\psi(x)\right|^2 \log_2\left|\psi(x)\right|^2 dx$ - неопределенность (информация) сохраняется.

Утверждение. При локальных калибровочных преобразованиях [18-20] $\psi'(x) = e^{i\alpha(x)}\psi'(x)$ неопределенность (информация) сохраняется.

Поскольку $\psi(x)$ - комплексное число, а $e^{i\alpha(x)}$, в общем случае матрица, то $e^{-i\alpha}\overline{\psi}(x)\psi(x)e^{i\alpha} = e^{-i\alpha}|\psi(x)|^2 e^{i\alpha} = |\psi(x)|^2 e^{-i\alpha}e^{i\alpha} = |\psi(x)|^2$ (комплексное число $\psi(x)$ коммутирует с матрицей $e^{-i\alpha(x)}$). Следовательно, неопределенность (информация) сохраняется.

Утверждение. Наблюдаемые представляемы эрмитовыми операторами.
Собственные значения эрмитовых операторов наиболее просты (вещественны), поэтому наблюдаемые представляются именно ими.

Реализуемость физических преобразований

Утверждение. Трансляционные преобразования сохраняют неопределенность (информацию), поэтому они в силу закона сохранения неопределенности (информации), физически реализуемы.

Утверждение. Собственные вращения сохраняют неопределенность (информацию), поэтому они в силу закона сохранения неопределенности (информации), физически реализуемы.

Утверждение. Преобразования классической механики (преобразования Галилея) сохраняют неопределенность (информацию), поэтому они в силу закона сохранения неопределенности (информации), физически реализуемы.

Утверждение. Преобразования специальной теории относительности (преобразования Лоренца) сохраняют неопределенность (информацию), поэтому они в силу закона сохранения неопределенности (информации), физически реализуемы.

Утверждение. Отражения, несобственные вращения, обращение времени в изолированной (замкнутой) системе запрещены поскольку определители соответствующих преобразований равны минус единице и физически нереализуемы.

Примечание. В соответствии с законом сохранения неопределенности (информации) изолированная (замкнутая) физическая система не может перейти из состояния $\psi(x)$ в состояние $\psi(-x)$ (отражение), из состояния $\psi(x)$ в состояние $\psi(-Ux)$ (несобственное вращение) и из состояния $\psi(x,t)$ в состояние $\psi(x,-t)$ (обращение времени), но системы, описываемые волновыми функциями $\varphi(x) = \psi(-x)$, $\varphi(x) = \psi(-Ux)$, $\varphi(x,t) = \psi(x,-t)$ существовать могут.

Утверждение. Глобальные калибровочные преобразования $\psi'(x) = e^{i\alpha}\psi'(x)$, $\alpha = const$ сохраняют неопределенность, поэтому они в силу закона сохранения неопределенности (информации), физически реализуемы.

Утверждение. Локальные калибровочные преобразования $\psi'(x) = e^{i\alpha(x)}\psi'(x)$ сохраняют неопределенность, поэтому они в силу закона сохранения неопределенности (информации), физически реализуемы.

Свойства пространства-времени

Утверждение. Физическая реализуемость трансляционного преобразования времени означает однородность времени.

Утверждение. Физическая реализуемость трансляционного преобразования пространства означает однородность пространства.

Утверждение. Физическая реализуемость преобразования собственного вращения пространства означает изотропность пространства.

Физические законы как следствие информационных законов

Утверждение. Пространственная неопределенность (информация о расположении частицы в пространстве) определяет ньютоновский гравитационный потенциал и кулоновский потенциал (первая производная неопределенности по радиусу), напряженность гравитационного поля и кулоновского поля (вторая производная неопределенности по радиусу).

Ньютоновский гравитационный потенциал в точке b, создаваемой точечной массой M_a, находящейся в точке а, $\varphi = -\frac{G \cdot M_a}{r_{ab}}$, где G - гравитационная постоянная, r_{ab} - расстояние от точки a до точки b. Потенциальная энергия тела с массой m_b, находящегося в точке b, равна $\phi \cdot m_b$, т. е. φ потенциальная энергия тела единичной массы в данной точке гравитационного поля, а напряженность гравитационного поля равна градиенту гравитационного потенциала $F = -\frac{\partial \varphi}{\partial r}$. Рассмотрим трехмерное евклидово пространство R^3. Выделим в нем шар радиуса r и объема $V = \frac{4}{3}\pi r^3$. Предположим, что в шаре располагается частица, радиус которой равен r_0 и объема $V_0 = \frac{4}{3}\pi r_0^3$. Неопределенность расположения частицы в шаре (пространственная неопределенность частицы) равна $N = \log_2 \frac{V}{V_0} = 3\log_2 \frac{r}{r_0} = 3\log_2 r - 3\log_2 r_0$. Первая производная от неопределенности по радиусу $\frac{dN}{dr} = \frac{3}{\ln 2} \cdot \frac{1}{r}$ с точностью до константы есть гравитационный потенциал единичной массы. Вторая производная от неопределенности по радиусу $\frac{d^2 N}{dr^2} = -\frac{3}{\ln 2} \cdot \frac{1}{r^2}$ с точностью до константы есть напряженность гравитационного поля. Таким образом, пространственная неопределенность (информация о расположении частицы в пространстве) определяет ньютоновский гравитационный потенциал (первая производная неопределенности по радиусу) и напряженность гравитационного поля (вторая производная неопределенности по радиусу).

Аналогичным образом связано с пространственной неопределенностью и кулоновское взаимодействие.

Утверждение. Из однородности времени следует закон сохранения энергии.

Утверждение. Из однородности пространства следует закон сохранения импульса.

Утверждение. Из изотропности пространства следует закон сохранения момента импульса.

Утверждение. Из инвариантности лагранжиана относительно глобального калибровочного преобразования типа $\varphi' = e^{i\alpha Q}\varphi$, где Q - заряд частицы, описываемой полем φ, а α - произвольное число, не зависящее от пространственно-временных координат частицы, следует закон сохранения заряда.

Утверждение. Из инвариантности лагранжиана относительно локального калибровочного преобразования типа $\psi'(x) = e^{i\alpha(x)}\psi'(x)$, где $\alpha(x)$ – в общем случае матрица, зависящая от пространственно-временных координат, следуют законы электромагнитного, слабого и сильного взаимодействия.

Утверждение. Из закона сохранения неопределенности (информации) следует термодинамическое уравнение Гиббса (основное термодинамическое тождество).

Предположим, что при переходе системы из начального состояния в конечное состояние формируются частицы (кванты излучения с нулевой массой покоя), каждая из которых содержит I_p =1 бит и имеет энергию $E_p = h\nu$. В силу закона сохранения неопределенности (информации) сформировавшиеся частицы должны обладать информацией равной $\Delta I = I' - I''$, т.е. должно сформироваться $n = I' - I'' = \Delta I$ квантов излучения. В силу закона сохранения энергии, сформировавшиеся кванты излучения должны обладать энергией $nh\nu$ равной $\Delta U = U'' - U'$. Таким образом, $nh\nu = \Delta U$. Будем считать, что система представляет собой абсолютно черное тело. Средняя энергия излучения связана с температурой теплового излучения абсолютно черного тела $E_p = h\nu = 2{,}7kT$ [21]. Поскольку $n = \Delta I$, то $\Delta I \cdot 2{,}7kT = \Delta U$, или $T = \dfrac{\Delta U}{2{,}7k\Delta I}$. При $\Delta S = k\Delta I$ $T = \dfrac{\Delta U}{2{,}7\Delta S}$ или $\Delta U = 2{,}7T\Delta S$. В дифференциальном виде $T = \dfrac{dU}{2{,}7kdI}$ или $dU = 2{,}7kTdI$. При $\mathrm{d}S = kdI$ $T = \dfrac{dU}{2{,}7dS}$ или $dU = 2{,}7TdS$. Таким образом, из законов сохранения неопределенности (информации) и энергии, в частном случае при $\mathrm{d}S = kdI$ следует термодинамическое уравнение Гиббса (основное термодинамическое тождество): $dU = 2{,}7TdS$. Обобщение на более общий случай $dU = TdS - PdV + \sum_j \mu_j dN_j$ производится путем учета выполняемой работы и учета добавления частиц в систему без совершения работы и добавлением в правую часть соответствующих слагаемых. Следуя отметить отличие приводимого выражения от стандартной формы термодинамического уравнения Гиббса (основного термодинамического тождества) – наличие в правой части коэффициента 2,7.

Предположим, что при переходе системы из начального состояния в конечное состояние формируются частицы (адроны: барионы и мезоны с ненулевой массой покоя), каждая из которых содержит I_p бит и имеет энергию $E_p = m_p c^2 + \dfrac{m_p c^2}{2}$. В силу закона сохранения неопределенности (информации) сформировавшиеся частицы должны обладать информацией равной $\Delta I = I' - I''$, т.е. должно сформироваться $n = \dfrac{\Delta I}{I_p}$ частиц. В силу закона сохранения энергии сформировавшиеся частицы должны обладать энергией $nE_p = nm_p c^2 + n\dfrac{m_p c^2}{2}$ равной $\Delta U = U'' - U'$. Таким образом, $\dfrac{\Delta I}{I_p} m_p c^2 + \dfrac{\Delta I}{I_p}\dfrac{m_p c^2}{2} = \Delta U$. Будем считать, что каждая частица имеет три степени свободы. Тогда $\dfrac{m_p c^2}{2} = \dfrac{3}{2}kT$. Поскольку $\dfrac{\Delta I}{I_p} m_p c^2 + \dfrac{\Delta I}{I_p}\dfrac{m_p c^2}{2} = \Delta U$, то $\dfrac{\Delta I}{I_p} m_p c^2 + \dfrac{\Delta I}{I_p}\dfrac{3}{2}kT = \Delta U$, или $\Delta U - \dfrac{\Delta I}{I_p} m_p c^2 = \dfrac{3}{2}\dfrac{\Delta I \cdot k}{I_p}T$. При $\Delta S = k\Delta I$ $\Delta U - \dfrac{\Delta I}{I_p} m_p c^2 = \dfrac{3}{2I_p}T\Delta S$. В дифференциальном виде $dU - \dfrac{dI}{I_p} m_p c^2 = \dfrac{3}{2I_p}TdS$. Таким образом, из законов сохранения неопределенности (информации) и энергии, в частном случае при $dS = kdI$, следует термодинамическое уравнение Гиббса (основное термодинамическое тождество): $dU - \dfrac{dI}{I_p} m_p c^2 = \dfrac{3}{2I_p}TdS$. Обобщение на более общий случай $dU = TdS - PdV + \sum_j \mu_j dN_j$ производится путем учета выполняемой работы и учета добавления частиц в систему без совершения работы и добавлением в правую часть соответствующих слагаемых.

Следуя отметить отличия приводимого выражения от стандартной формы термодинамического уравнения Гиббса (основного термодинамического тождества) – наличие в левой части дополнительного слагаемого $-\frac{dI}{I_p}m_p c^2$ и в правой части коэффициента $\frac{3}{2I_p}$.

Поскольку закон сохранения энергии следует из закона сохранения неопределенности (информации), то термодинамическое уравнение Гиббса (основное термодинамическое тождество) следует из закона сохранения неопределенности (информации).

Информационная связь между наблюдаемыми

Утверждение. Если наблюдаемые A и B совместны, $\{\psi_{nm}\}$ образуют полную систему собственных векторов наблюдаемых $\hat{A}$ и $\hat{B}$ и $c_{nm}=(\psi_{nm},\psi)$ для произвольного состояния ψ, то неопределенность наблюдаемых $\hat{A}$ и $\hat{B}$ состояния ψ одинакова и равна $N(\psi)=-\sum\limits_{nm}\left|c_{nm}\right|^2\ln\left|c_{nm}\right|^2$.

Утверждение. Если состояние объекта в q-представлении задано волновой функцией ψ(q), где q – обобщенная координата квантового объекта, то состояние объекта в p-представлении задается волновой функцией φ(p), причем состояние в дополнительном к q-представлению – p-представлении — связано с состоянием в q-представлении преобразованием Фурье $\varphi(p)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_{-\infty}^{\infty}\psi(q)\,e^{-i\,2\pi\,p\,q}dq$.В свою очередь, состояние в исходном q-представлении связано с состоянием в дополнительном p-представлении обратным преобразованием Фурье: $\psi(q)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_{-\infty}^{\infty}\psi(q)\,e^{\,i\,2\pi\,p\,q}dp$.

Суммарная неопределенность обобщенной и дополнительной координат q' и p’ при масштабном преобразовании (умножении аргумента q на число k > 0) равна исходной суммарной неопределенности обобщенной и дополнительной координат q и p $N_{q'}+N_{p'}=N_q+N_p$.

Утверждение. Если операторы $\hat{A}$ и $\hat{B}$ не коммутируют друг с другом: $\hat{A}\,\hat{B}\ -\ \hat{B}\,\hat{A}\ =$ $[\,\hat{A},\hat{B}\,]$ = C ≠ 0, то суммарная неопределенность наблюдаемых A' и B', определяемых операторами $\hat{A}'=k\hat{A}$, $\hat{B}'=\frac{1}{k}\hat{B}$ (k > 0), равна исходной суммарной неопределенности наблюдаемых A и B, определяемых операторами $\hat{A}$ и $\hat{B}$ $N_{A'}+N_{B'}=N_A+N_B$.

Утверждение. Если операторы $\hat{A}$ и $\hat{B}$ антикоммутируют друг с другом: $\hat{A}\,\hat{B}+\hat{B}\,\hat{A}$=0, то суммарная неопределенность наблюдаемых A' и B', определяемых операторами $\hat{A}'=k\hat{A}$, $\hat{B}=\frac{1}{k}\hat{B}$ (k > 0), равна исходной суммарной неопределенности наблюдаемых A и B, определяемых антикоммутирующими операторами $\hat{A}$ и $\hat{B}$ $N_{A'}+N_{B'}=N_A+N_B$.

Связь между информацией и массой в разных типах материи

Утверждение. Черная дыра содержит неоднородности (информацию) в объеме пропорциональном квадрату массы: $I_{Чд}=\alpha_{Чд}M_{Чд}^2$.

Утверждение. Нейтронная звезда (белый карлик) содержит неоднородности (информацию) в объеме пропорциональном массе, умноженной на логарифм массы: $I_{Нз}=\alpha_{Нз}M_{Нз}\log_2\beta_{Нз}M_{Нз}$.

Утверждение. Обычное вещество содержит неоднородности (информацию) в объеме пропорциональном массе: $I_{Ов}=\alpha_{Ов}M_{Ов}$.

Утверждение. Темная материя содержит неоднородности (информацию) в объеме пропорциональном массе: $I_{Тм}=\alpha_{Тм}M_{Тм}$ ($\alpha_{Тм}\ll\alpha_{Ов}$), но существенно меньшем, чем обычное вещество.

Утверждение. Темная энергия не содержит неоднородностей (информации): $I_{Тэ}(M_{Тэ}) = 0$.

Утверждение. В общем случае зависимость объема информации (информационной емкости) материи от массы имеет вид $I = f(M)$ бит.

Дифференциальная информационная емкость материи и информационный спектр частоты и температуры излучения

Утверждение. Изменение объема информации dI в материи при изменение ее массы dM определяется дифференциалом функции $I = f(M)$

$$dI = \frac{df(M)}{dM}dM = f'(M)dM .$$

Утверждение. Для обычного вещества $I = \beta M$, $f'(M) = \beta$. дифференциальная информационная емкость обычного вещества не зависит от его массы.

Утверждение. Для черных дыр: $I = \alpha M^2$, $f'(M) = 2\alpha M$.

Утверждение. Для нейтронных звезд, состоящих в основном из нейтронов (объем информации в нейтроне равен 9,422 бит): $I = (M/m)(9{,}422 + \log_2(M/m))$, где m – масса нейтрона.

Утверждение. Для белых карликов, состоящих в основном из элементов с порядковым номером z (числом электронов z) объем информации $I_{wd\ z} = I_z M / m_z + zM / m_z \log_2 zM / m_z$, где m_z – масса рассматриваемого элемента.

Утверждение. Рассмотрим физическую систему, имеющую зависимость объема информации в материи от массы $I = f(M)$ бит. Рассмотрим процесс формирования системой излучения при потере массы. При потере массы ΔM система также теряет информацию ΔI: $\Delta I = f'(M)\Delta M$. Из закона сохранения неопределенности (информации) следует, что должно сформироваться $n = \Delta I$ квантов излучения, энергией $E = h\nu$ каждый и соответственно массой $m = \frac{h\nu}{c^2}$. В силу закона сохранения энергии общая масса квантов излучения равна $\Delta M = n\frac{h\nu}{c^2} = \Delta I\frac{h\nu}{c^2}$. Следовательно, $\Delta I = f'(M)\Delta I\frac{h\nu}{c^2}$ и $1 = f'(M)\frac{h\nu}{c^2}$. Частота излучения рассматриваемой системы равна $\nu = \frac{c^2}{hf'(M)}$.

Информационный спектр частоты излучения материи (спектр частоты, которую имеет излучение материи соответствующей массы) обратно пропорционален дифференциальной информационной емкости.

Будем считать, что система представляет собой абсолютно черное тело. Температура теплового излучения абсолютно черного тела связана со средней энергией излучения $h\nu = 2{,}7kT$ [25] $T = \frac{h\nu}{2{,}7k}$.

Информационный спектр температуры материи (спектр температуры которую имеет излучение материи соответствующей массы) обратно пропорционален дифференциальной информационной емкости $T = \frac{c^2}{2{,}7kf'(M)}$.

Размерность пространства

Утверждение. Пространство трехмерно.

1) В соответствии с законом необходимого разнообразия Эшби 1-и 2-мерное пространство недостаточны для сколько-нибудь сложно устроенной нервной системы. Следовательно, система, сравнимая по сложности с человеком может возникнуть в пространстве размерности не меньшем трех.

2) Эренфест рассматривает физику в n-мерном евклидовом пространстве E^n. Закон взаимодействия с точечным центром он выводит из дифференциального уравнения Пуассона (закона Гаусса). В качестве законов динамики Эренфест использует обобщение ньютоновских законов динамики на случай E^n и на их основе анализирует устойчивость орбит в поле гравитирующего центра (планетная система) [23-25].

Оказывается, что только в пространстве размерности не большей трех – E^3 возможно устойчивое движение, только в пространстве E^3 возможно как устойчивое финитное, так и инфинитное движение.

3) Трехмерность пространства удовлетворяют и закону необходимого разнообразия Эшби и закону простоты сложных систем (принцип устойчивости). Следовательно, пространство трехмерно.

Утверждение. Пространство-время четырехмерно.

Утверждение. Взаимодействие частиц осуществляется через поля и/или искривление пространства-времени.

Доказательство следует из принципа полевого взаимодействия: взаимодействие между частями, элементами системы осуществляется через носители взаимодействия. Кроме того, частица может изменить состояние пространства-времени, например, искривить пространство-время, которое будет воздействовать на другие частицы. Частицам при этом «не нужно знать законы взаимодействия» им необходимо и достаточно чувствовать свое (и) поле (я) и/или кривизну пространства-времени.

Утверждение. Принцип информационной эквивалентности инерциальных систем координат: неопределенность описания объекта одинакова во всех инерциальных системах координат; объем информации об объекте, получаемый при его измерениях в различных инерциальных системах координат в единицу времени, одинаков.

Утверждение. Конечная скорость распространения взаимодействия есть необходимое условие устойчивости физических систем.

Покажем, что при бесконечной скорости взаимодействия физическая система становится неустойчивой. Рассмотрим взаимодействие между двумя объектами А и В (рис. 1).

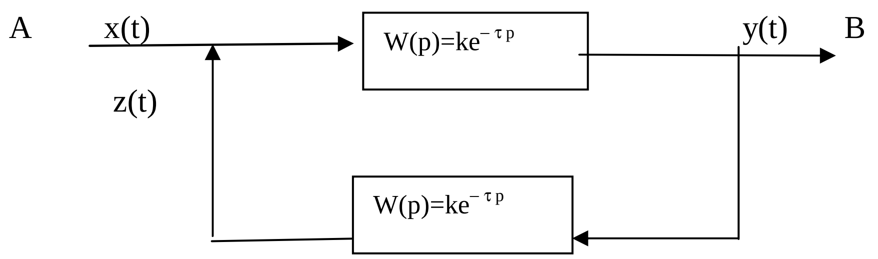


Рис. 1. Схема взаимодействия объектов А и В

В силу однородности и изотропности пространства время распространения носителя взаимодействия от А до В и обратно одинаково и равно τ: $y(t) = z(t-\tau)$, $z(t) = x(t) + y(t-\tau)$. Передаточные функции, описывающие передачу носителя взаимодействия из А в В и В в А, равны $W(p) = e^{-\tau p}$. Передаточная функция, описывающая взаимодействие объектов А и В, равна $W(p) = \dfrac{e^{-\tau p}}{1-e^{-2\tau p}}$ или $W(p) = \dfrac{e^{\tau p}}{e^{2\tau p}-1}$, а характеристическое уравнение системы взаимодействующих объектов А и В имеет вид: $e^{2\tau p} - 1 = 0$

При $e^{2\tau p}=1$ или $\tau=0$ система неустойчива, что возможно только при бесконечной скорости распространения взаимодействия. Т.о. свойство устойчивости систем реализуется при конечной скорости распространения взаимодействия.

Отметим, что для устойчивости системы необходимо ограничение скорости взаимодействия любой константой. В соответствии с современными физическими представлениями скорость распространения всех видов взаимодействия ограничена скоростью света.

Утверждение. Скорость взаимодействия: конечна и одинакова при любом расположении в пространстве взаимодействующих объектов (это является следствием устойчивости, однородности и изотропности пространства);

одинакова в любой момент времени (это является следствием однородности времени); конечна и одинакова во всех инерциальных системах координат (последнее является следствием из принципа информационной эквивалентности инерциальных систем координат).

Симметрия Вселенной определяет характер ее расширения. Основные космологические постулаты [21-29] являются следствием закона простоты сложных систем.

Законы расширения Вселенной

Утверждение. Законы простоты сложных систем и сохранения неопределенности определяют самую простую систему космологических моделей, адекватно описывающую Вселенную, когда: Вселенная является объектом однородным. Вселенная является объектом изотропным. Вселенная является объектом плоским.Вселенная тождественна Метагалактике.

Данные постулаты приводят к уравнениям Эйнштейна-Фридмана-Леметра $\ddot{a}+\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)=-\frac{4\pi G}{3}a(3p+\varepsilon)$, $(\dot{a})^2=\frac{8\pi G}{3}\varepsilon a^2$. Для излучения $\varepsilon\propto a^{-4}$, для вещества $\varepsilon\propto a^{-3}$, соответственно зависимости масштабного фактора от времени имеют вид: для эры излучения $a=\left(\frac{8\pi G}{3}\right)^{\frac{1}{4}}t^{\frac{1}{2}}$, для эры вещества $a=(6\pi G)^{\frac{1}{3}}t^{\frac{2}{3}}$.

Утверждение. Увеличение масштабного фактора в период инфляции составляет примерно $\approx 10^{45}$ раз.

Начальные неоднородности Вселенной

Утверждение. В начальные моменты времени во Вселенной существовали неоднородности обычной материи.

Предположим, что в начальный момент времени t_0 во Вселенной не было неоднородностей обычной материи: $P(x,t_0)\equiv R(x)$. Так как информационная дивергенция $D(P(x)/R(x))$ распределения $P(x)$ относительно равномерного распределения $R(x)$ и информационная дивергенция $D(P(y)/R(y))$ распределения $P(y)$ относительно равномерного распределения $R(y)$ при $y=y(x)$ равны (не равны) нулю одновременно $D(P(x)/R(x))=0\Leftrightarrow D(P(y)/R(y))=0$ или $D(P(x)/R(x))\neq 0\Leftrightarrow D(P(y)/R(y))\neq 0$, то информационная дивергенция в произвольный момент времени $t\geq t_0$ также равна нулю. Это означает, что в произвольный момент времени $t\geq t_0$ во Вселенной нет неоднородностей обычной материи, а т.к. в настоящее время в нашей Вселенной, очевидно, есть неоднородности обычной материи (скопления галактик, галактики, звезды, планеты, молекулы, атомы, частицы), то в начальные моменты времени во Вселенной неоднородности обычной материи были.

Примечание. Данное утверждение справедливо при любой физической природе, при любом механизме образования неоднородностей и любой модели формирования неоднородностей [21-29].

Утверждение. Для формирования к моменту времени $10^{-10}c$ примерно 10^7 бит классической информации необходимо иметь в момент $10^{-34} c$ начальную информацию объемом примерно 10^2 бит классической информации и, соответственно, массу неоднородностей Вселенной порядка 10^4кг, необходимую для «записи» физических законов. Такова оценка массы начальной неоднородности, содержащей все законы природы в момент времени $10^{-10} c$.

Утверждение. В начальные моменты времени неоднородности темной материи во Вселенной существовали.

Утверждение. В начальный и последующие моменты времени неоднородностей в темной энергии не было. Темная энергия (вакуум) была распределена равномерно.

Формирование информации при расширении Вселенной

Утверждение. Причины и источники формирования информации – расширение Вселенной и ее исходная неоднородность. При расширении Вселенной изменяется ее фазовое состояние (симметрия) и кривизна пространства; формируются различные типы неоднородностей массы и энергии, в частности, возникают фундаментальные и элементарные частицы, галактические, звездные, планетные системы; формируется классическая информация, в том числе, аминокислоты, азотистые основания, белки, ДНК, организмы, цивилизации.

Утверждение. Фазовые переходы формируют неопределенность (информацию).

Утверждение. При инфляционном расширении при сохранении числа частиц объем информации во Вселенной растет пропорционально времени расширения $I(t) \propto t$.

Утверждение. При степенном расширении и при сохранении числа частиц объем информации во Вселенной растет пропорционально логарифму времени расширения $I(t) \propto \log_2 t$.

Утверждение. Кривизна пространства формирует неопределенность (информацию). Кривизна пространства-времени формирует неопределенность (информацию), определяемую через метрический тензор искривленного пространства

$$\Delta N = -\int \ldots \int \left|\psi(x^0, x^1, x^2, x^3)\right|^2 \log_2 J\left(\frac{x^0, x^1, x^2, x^3}{x'^0, x'^1, x'^2, x'^3}\right) dx^0 dx^1 dx^2 dx^3 =$$

$$= -\int \ldots \int \left|\psi(x^0, x^1, x^2, x^3)\right|^2 \log_2 \sqrt{-g}\, dx^0 dx^1 dx^2 dx^3 \text{ бит.}$$

Утверждение. Объем информации, формируемый в движущейся с ускорением системе координат, равен $\frac{ax}{c^2}$ бит

Примечание. Обратим внимание на аналогию полученного результата с эффектом УНРУ [29].

Утверждение. Объем информации, формируемый гравитационным полем с нерелятивистским потенциалом, порождаемым массой M, равен $2G\frac{M}{Rc^2}$ бит.

Утверждение. Объем информации, формируемый во вращающейся системе отсчета, равен $\frac{\Omega^2 r^2}{2c^2} - \log_2 r$, где Ω - скорость вращения.

Совместная энтропия матриц смешивания электрослабого взаимодействия и матриц смешивания кварков

Утверждение. Оценки совместной энтропии по независимым экспериментальным данным, характеризующим матрицы смешивания электрослабого взаимодействия (1,7849; 1,7787; 1,7645; 1,7945), близки к оценкам совместной энтропии, характеризующим матрицы смешивания кварков (1,7842, 1,7849), что свидетельствует о единой информационной и физической природе сильного и электрослабого взаимодействия.

Информационные ограничения на образование и слияние черных дыр

Утверждение. Для образования черной дыры массы M кг, необходимо сформировать $n=\frac{M}{m_0}$ субпланковских частиц и использовать $\frac{n(n+1)}{2}=\frac{\frac{M}{m_0}\left(\frac{M}{m_0}+1\right)}{2}\approx\frac{M^2}{2m_0^2}$ квантов излучения.

Утверждение. Черная дыра не может быть получена путем слияния k черных дыр. Слияние черных дыр может происходить только с дополнительным поглощением и/или излучением обычного вещества.

Утверждение. Черная дыра может уменьшать или увеличивать свою массу, излучая или поглощая обычное вещество. При слиянии двух черных дыр одна из них должна излучить, другая поглотить обычное вещество.

Утверждение. При слиянии двух черных дыр, имеющих массы M_1, M_2, без использования дополнительно обычного вещества масса получившейся черной дыры M_{1+2} меньше $\sqrt{M_1^2+M_2^2}$.

Утверждение. При слиянии двух черных дыр, имеющих массы M_1, M_2, с использованием дополнительно обычного вещества масса получившейся черной дыры M_{1+2} больше $\sqrt{M_1^2+M_2^2}$.

Утверждение. При слиянии двух черных дыр одинаковой массы $M_1=M_2=nm_0$ и одинаковых объемов информации $I_1=I_2=\frac{n(n+1)}{2}$ поглощающая черная дыра должна поглотить дополнительно не менее n^2 частиц обычного вещества, содержащих по одному биту информации.

Примечание. Из приведенных утверждений следует, что гипотеза Р. Пенроуза о поглощении черными дырами всей материи Вселенной невыполнима [30].

Оптимальные черные дыры [4]

Утверждение. Существуют оптимальные черные дыры, при которых минимален объем информации в области Вселенной массы $M_{Обл\ Вс}$, состоящей из обычного вещества и одной черной дыры.

Примечание. Оптимальные черные дыры могут существовать при наличии во Вселенной материи по крайней мере двух типов: с нелинейной (например, $I=\gamma\cdot M^{\delta}$ при $\gamma>0, \delta>1$) и линейной зависимостью объема информации от массы.

Утверждение. Масса черной дыры, при которой минимален объем информации в области Вселенной массы $M_{Reg\ Un}$, состоящей из обычного вещества и одной черной дыры, равна $M_{Bhopt}=\frac{\beta}{2\alpha}$. Объем информации в оптимальной черной дыре пропорционален квадрату коэффициента, связывающего объем информации с массой в обычном веществе, и обратно пропорциональна коэффициенту, связывающего объем информации с массой в черной дыре: $I_{Чд\ опт}=\frac{\beta^2}{4\alpha}$.

Примечание. Рассмотрим задачу определения максимальной массы системы «черная дыра – обычное вещество» при заданном объеме информации в системе. Объемы информации и массы, полученные при решении прямой задачи (минимизация объема информации в системе «черная дыра – обычное вещество» при заданной массе системы – утверждения 1, 2) и двойственной задачи (максимизация массы системы «черная дыра – обычное вещество» при заданном объеме информации в системе), совпадают, что означает однозначность понятия оптимальной черной дыры.

Утверждение. Минимальный объем информации во Вселенной, состоящей из оптимальных черных дыр в два раза меньше объема информации во Вселенной той же массы, наполненной только обычным веществом: $I_{Вс\,Чд} = \frac{M_{Вс} \cdot \beta}{2}$.

Утверждение. Концентрация массы $M = \frac{\hbar \cdot c^3}{4\pi \cdot G \cdot k \cdot T}$ в оптимальной черной дыре минимизирует объем информации в системе «излучение — черные дыры».

Утверждение. Вселенная, имеющая массу $M_{Вс}$, состоящая из излучения и $N_{Чд\,опт} = M_{Вс} \frac{4\pi \cdot G \cdot k \cdot T}{\hbar \cdot c^3}$ черных дыр массой $M_{Чд.опт} = \frac{\hbar \cdot c^3}{4\pi \cdot G \cdot k \cdot T}$, содержит минимально возможный объем информации, равный $I_{Вс\,мин} = M_{Вс} \frac{c^2}{2 \cdot k \cdot T \cdot \ln 2}$ бит.

Утверждение. Концентрация массы $M_{Чд.опт} = \frac{11{,}422 \cdot \ln 2 \cdot \hbar \cdot c}{4\pi \cdot m_p \cdot G}$ в оптимальной черной дыре минимизирует объем информации в системе «водород — черные дыры».

Утверждение. Минимально возможный объем информации во Вселенной, имеющей массу $M_{Вс}$, состоящей из атомов водорода и черных дыр, равен $I_{Вс\,мин} = I_{Чд\,опт} \cdot N_{Чд\,опт} = \frac{M_{Вс} \cdot \beta}{2} = M_{Вс} \frac{11{,}422}{2 \cdot m_p} = 5{,}7 \frac{M_{Вс}}{m_p}$ бит,

Примечание. При температуре излучения $T = m_p \frac{c^2}{k \cdot \ln 2 \cdot 9{,}422} = 1{,}555 \cdot \mathrm{E} + 12$ K

масса оптимальных черных дыр, возникших в системах «излучение – черная дыра», примерно равна массе оптимальных черных дыр, возникших в системах «водород (протоны) – черная дыра».

Примечание. В период перехода от Вселенной с преобладанием излучения к Вселенной с преобладанием вещества (10^4>T >10^3) масса оптимальной черной дыры в системе «излучение – черная дыра» меняется от 2,45 10^{19}кг до 2,45 10^{20}кг.

Утверждение. Если оптимальные черные дыры формируются из различных типов атомов обычного вещества или смеси различных типов атомов обычного вещества, то массы оптимальных черных дыр и объемы информации в них примерно одинаковы.

Утверждение. В оптимальной черной дыре, сформированной в системе «излучение (фотоны) – черная дыра», при температуре 2,7K $\approx 10^{62}$ бит. В оптимальной черной дыре, сформированной в системе «водород (протоны) – черная дыра», $\approx 2{,}57 \cdot 10^{38}$ бит.

Представление квантовой системы в виде системы q-битов

Утверждение. Произвольное состояние квантовой системы конечной размерности может быть представлено в виде прямой суммы тензорных произведений q-битов [4].

Утверждение. Для формирования фундаментальных частиц необходимо не менее шести q-битов [7].

Утверждение. Из закона сохранения неопределенности следует, что если система из n q-битов находится в состоянии ψ, то при изменении координат отдельных q-битов, подмножеств q-битов, подсистем, сцепленного состояния в целом, неопределенности сцепленных состояний сохраняются. При изменении ориентации в пространстве отдельных q-битов, подмножеств q-битов, сцепленного состояния в целом, неопределенности сцепленных состояний также сохраняются. Q-биты, входящие в состав сцепленного состояния, можно перемещать с произвольной скоростью друг относительно друга, не меняя неопределенность.

Утверждение. Копирование (клонирование) квантовых объектов с неизвестными состояниями невозможно.

Утверждение. Любые вычисления на квантовом компьютере можно выполнять с сохранением неопределенности.

Классическая информация

Классическая информация (макроинформация) – запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных, в отличие от микроинформации как выбора не запоминаемого [31]. Жизнь – это эффективный способ формирования классической информации, которую можно хранить, копировать, использовать. Классическая информация формируется как естественным путем (реализуя процесс создания и развития жизни во Вселенной, в частности, на Земле), так и искусственно (развитыми цивилизациями в процессе жизнедеятельности).

Утверждение. Избыточность классической информации, порождаемой атомами, по отношению к микроинформации составляет при температуре 300K $\approx 10^{10}$ раз. Избыточность классической информации, порождаемой жизнью, по отношению к микроинформации составляет при температуре 300K $\approx 10^{13}$ раз.

Утверждение. Белки и аминокислоты для формирования 1 бита информации используют массу всего на три порядка больше, чем атомы, т.е. жизнь – это эффективный способ формирования классической информации.

Утверждение. Избыточность классической информации, порождаемой современной цивилизацией, по отношению к микроинформации составляет $\approx 10^{23-25}$ раз.

Утверждение. Человек содержит $\approx 10^{25}$ бит классической информации.

Утверждение. Биомасса Земли содержит $\approx 10^{40}$ бит классической информации. При использовании 100% массы Земли для формирования живого вещества будет сформировано $\approx 10^{50}$ бит классической информации. Максимально возможный объем классической информации во Вселенной $\approx 10^{77}$ бит.

Утверждение. Эффективность природы по формированию классической информации превосходят эффективность человека и земной цивилизации в $\approx 10^{10}$ раз. Объем классической информации, формируемой земной цивилизацией, $<10^{30}$ бит/год, а соотношение объемов информации во Вселенной в год, порождаемой материей и цивилизацией, $\approx 10^{-49}$. Доля информации, формируемой цивилизацией на одну звездную систему, равна 10^{-27}, т.е. в настоящее время вклад цивилизации в формирование информации во Вселенной ничтожен.

Фундаментальные ограничения на характеристики информационных систем

Утверждение. Оценки объема информации в атомах, аминокислотах, азотистых основаниях определяют фундаментальные ограничения на информационную емкость устройств хранения данных [6-7].

Утверждение. Разность энергий базисных состояний атома водорода, рассматриваемого как q-бит, накладывают фундаментальные ограничения на быстродействие вычислительных устройств [32].

Примечание. Ограничения 10^{28} бит/кг, $1,5 \cdot 10^{39}$ (оп/с)/кг можно добавить в ряд фундаментальных природных ограничений, включающих скорость света, элементарный заряд, планковское время, …

Познание Вселенной

Утверждение. Субъект познания должен быть классическим объектом.

Утверждение. Познание системы с конечной информацией внешним наблюдателем возможно тогда и только тогда, когда его разнообразие R_{oo} превосходит разнообразие наблюдаемой системы:$R_s < R_{oo}$.

Утверждение. Познание части системы с конечной информацией внутренним наблюдателем возможно тогда и только тогда, когда его разнообразие R_{oi} превосходит разнообразие наблюдаемой части системы R_{ps}, $R_{os} < R_{oi}$. Поскольку внутренний наблюдатель является частью системы, то его разнообразие плюс разнообразие наблюдаемой части системы не может быть больше разнообразия R_s всей системы (предполагаем, что разнообразие аддитивно) $R_{os} + R_{oi} \leq R_s$.

Утверждение. Система с конечной информацией эффективно познаваема внутренним наблюдателем при коэффициенте сжатия разнообразия не меньшем величины $(R_{os} + R_{oi})/R_{oi}$.

Утверждение. Вселенная с конечной информацией эффективно познаваема.

Утверждение. Коэффициент сжатия информации в процессе познания Вселенной не может быть более 10^{76}.

Утверждение. Теоретический (описание) и экпериментальный (измерение) способы познания имеют одинаковую познавательную силу – объемы информации, получаемые при теоретических и экпериментальных исследованиях, одинаковы.

Информационное взаимодействие – пятый вид фундаментальных взаимодействий

Утверждение. Запутанность, сцепленность состояний, частей квантовой системы [33-35] порождает пятый вид взаимодействия - информационное.

Утверждение. Максимальное информационное взаимодействие I_{AB} подсистем A, B системы $A+B$ равно $I_{AB\max} = \log_2 d$ бит.

Утверждение. Информационное взаимодействие I_{AB} подсистем A, B системы $A+B$ лежит в диапазоне $I_{AB\min} \leq F_{I\,AB} \leq I_{AB\max}$ или $0 \leq F_{I\,AB} \leq \log_2 d$.

Поскольку для несцепленных (незапутанных) подсистем A, B $I_{AB\min} = 0$, то информационное взаимодействие $F_{I\,AB}$ подсистем A, B системы $A+B$ лежит в диапазоне $I_{AB\min} \leq F_{I\,AB} \leq I_{AB\max}$ или $0 \leq F_{I\,AB} \leq \log_2 d$.

Утверждение. Из закона сохранения неопределенности следует, что если система находится в состоянии ψ, то при изменении координат и ориентации q-битов, подмножеств q-битов, подсистем, сцепленного состояния в целом, неопределенности сцепленных состояний сохраняются. Q-биты, входящие в состав сцепленного состояния, также можно перемещать с произвольной скоростью друг относительно друга, не меняя неопределенность.

Утверждение. Максимальное информационное взаимодействие I_{AB} систем A, B во Вселенной не превосходит 10^{90} бит.

Примечание. Информационному взаимодействию подвержены все квантовые объекты, квантовые системы и подсистемы – бозоны и фермионы и т.д. В качестве переносчика (носителя) информационного взаимодействия в силу своей универсальности, по-видимому, выступает вакуум. (Определение носителя информационного взаимодействия – предмет дальнейших исследований.)

Примечание. Информационное взаимодействие нельзя трактовать как следствие и/или характеристику действия известных фундаментальных физических взаимодействий: гравитационного, электромагнитного, сильного, слабого, хотя сцепленные (запутанные) состояния и формируются с использованием этих взаимодействий, прежде всего электромагнитного взаимодействия. Невозможность такой трактовки объясняется тем, что информационное взаимодействие не зависит от расстояния, а все известные виды взаимодействия зависят.

Примечание. Следует отметить, что информационное взаимодействие в общем случае со временем уменьшается. Причиной этому служит декогерентизация сцепленных состояний, подсистем, обусловленная взаимодействием с внешней средой. Итак, в общем случае декогерентизация приводит к уменьшению и по истечению определенного времени к исчезновению информационного взаимодействия [34].

Информационное единство возможных вселенных

Утверждение. Поскольку неоднородности должны существовать во вселенных с любыми физическими законами, то подход, базирующийся на информационных характеристиках неоднородностей любой природы и соответствующие закономерности (законы информатики), распространяется на все возможные вселенные.

Утверждение. Информационные ограничения на возможные физические законы во всех вселенных одинаковы, поэтому во всех вселенных действуют законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, заряда,...

Не означает ли это идентичность всех возможных вселенных или единственность Вселенной?

Библиографический список использованных источников

1. Урсул А.Д. Природа информации. Философский очерк. 1-е издание. /Урсул А.Д. – М. Политиздат. 1968. 288 с. 2-е издание. Челябинск. Челябинская государственная академия культуры и искусств. 2010. 231 с.
2. Гуревич И.М. Законы информатики – основа исследований и проектирования сложных систем связи и управления. Методическое пособие. / И.М. Гуревич – М.: ЦООНТИ «Экос». 1989. – 60 с.
3. Гуревич И.М. «Законы информатики – основа строения и познания сложных систем». / И.М. Гуревич – М.: «Антиква», 2003. – 176 с.
4. Гуревич И.М. «Законы информатики – основа строения и познания сложных систем». Издание второе уточненное и дополненное. / И.М. Гуревич – М.: «Торус Пресс». 2007. 400 с.
5. Гуревич И.М. Оценка основных информационных характеристик Вселенной. / И.М. Гуревич //Информационные технологии. – 2008. – № 12. Приложение.
6. Гуревич И.М. Информационные характеристики физических систем./ И.М.Гуревич.– М.: «11-й ФОРМАТ», М. «Кипарис». Севастополь. – 2009. – 170 с.
7. Гуревич И.М. Информационные характеристики физических систем./ И.М.Гуревич.– «Кипарис». Севастополь. – 2010. – 260 с.
8. Гуревич И.М. Сжатие информации «Разумом» в процессе познания Вселенной. / И.М. Гуревич // Бюлл. Специальной астрофизической обсерватории, – 2007. – т. 60-61, – стр. 145-167.
9. Lisi A. Garrett. Quantum mechanics from a universal action reservoir. / A. Garrett. Lisi. arXiv:physics/0605068v1 [physics.pop-ph]. 8 May 2006.
10. Шеннон К. Математическая теория связи. / Шеннон К. // Работы по теории информации и кибернетики. М.: – Издательство иностранной литературы. – 1963. с. – 243-332.
11. Ландау Л.Д. Квантовая механика. Нерелятивистская теория./ Л.Д. Ландау, Е.М.Лившиц. М.: – Наука. – 1974.
12. Дирак П. Принципы квантовой механики. / П. Дирак. – М.: – Физматгиз. – 1960.
13. Садбери А. Квантовая механика и физика элементарных частиц. М. Мир, 1989.
14. Борисов А. В. Основы квантовой механики. Учебное пособие. / А. В. Борисов. – М.: Изд-во физического факультета МГУ. – 1999.
15. Фейнман Р. «Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, Э. Сэндс. – М.: «Мир». Тт. 8, 9. – 1967, 1968.

16. Zeilinger A. A Foundational Principle for Quantum Mechanics"/ A. Zeilinger. // Foundations of Physics. – 1999. – 29 (4). – pp. 631-43.

17. Соколов И.А. О методологии исследований. Предисловие к книге «Законы информатики – основа строения и познания сложных систем». Издание второе уточненное и дополненное. / И.А. Соколов. – М.: «Торус Пресс». 2007.

18. Хоофт Г.'т. Калибровочные теории сил между элементарными частицами. / Г.'т Хоофт. // "Успехи физических наук", – 1981. – т. 135, вып. 3, с.379. (перевод статьи из «Scientific. American», June 1980, Vol. 242, p.90.)

19. Славнов А.А. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. / А.А. Славнов, Л.Д. Фаддеев. – М.: Наука. 1978. – 238 с.

20. Сарданашвили Г. А. Современные методы теории поля. 1. Геометрия и классические поля. / Г. А. Сарданашвили. – М.: УРСС, 1996. – 224 с. – ISBN 5-88417-087-4.

21. Постнов К.А. Лекции по Общей Астрофизике для Физиков. Раздел 12. Курс кафедры астрофизики и звездной астрономии "Общая астрофизика" (для студентов физического факультета). / К.А. Постнов. http://www.astronet.ru/db/msg/1170612/index.html.

22. Ehrenfest P. – Ann. Phys., 1920, Bd 61, S. 440.

23. Эренфест П. Относительность. Кванты. Статистика. / П. Эренфест. – М.: Наука. 1972. 477 с.

24. Горелик Г.Е. Почему пространство трехмерно. / Горелик Г.Е. – М.: Наука. – 1982. (с. 75-77).

25. Долгов А.Д. Космология ранней Вселенной. / А.Д. Долгов, Я.Б. Зельдович, М.В. Сажин. – М.: Издательство Московского университета. – 1988. – 199 с.

26. Линде А.Д. «Физика элементарных частиц и инфляционная космология». / А.Д Линде. – М.: Наука. – 1990.

27. Ландау Л.Д. Теория поля. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – М.: Наука. – 1967. – 460с.

28. Фок В.А. Теория пространства и времени и тяготения. / В.А. Фок. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. – 1955. – 504с.

29. Фролов В.П. Гравитация, ускорение, кванты. / В.П. Фролов. – М.: «Знание». – 1988. – 64 с.

30. Пенроуз Р. Новый ум короля./ Р. Пенроуз. – М.: УРСС. – 2003. (Oxford University Press. – 1989).

31. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. / Д.С. Чернавский. – М.: "Наука" – 2001.

32. Margolus N., Levitin L. / N. Margolus, L. Levitin // Phys. Comp. 96. T. Toffoli, M. Biafore, J. Leao, eds. (NECSI, Boston) – 1996; Physical D 120, –1998 188-195.

33. Валиев К.А. Квантовые компьютеры: Надежда и реальность. / К.А Валиев, А.А. Кокин – Москва-Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика». – 2001.

34. Валиев К.А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления. / К.А Валиев. – УФН. –2005. Том 175. № 1.

35. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. / М. Нильсен, И. Чанг. – М.: «Мир» – 2006. – 822 с.

УДК 004.03; +530.1

А.Д. Панов, канд. физ.-мат. наук
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцина МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
panov@decl.sinp.msu.ru

ПРИРОДА МАТЕМАТИКИ И СТРУКТУРА РЕАЛЬНОСТИ. ОБЪЕКТИВНОСТЬ МИРА МАТЕМАТИЧЕСКИХ ФОРМ

1. Достаточные операциональные критерии объективной реальности

В статье обсуждается природа математики. Один из основных защищаемых тезисов будет состоять в том, что мир математических форм обладает объективным самостоятельным существованием, не принадлежа при этом ни миру материи, ни миру духа, но представляя третий сорт бытия, не сводимый к первым двум. При этом мы будем настаивать на том, что данный тезис не является спекулятивным философским утверждением, а имеет структуру научной истины в обычном понимании. Именно, он является утверждением, открытым для контроля опытом и допускающим фальсификацию.

В обсуждении мы систематически избегаем спекулятивных утверждений. Существенным исключением являются лишь начальные методологические принципы, которые имеют характер философской спекуляции просто по необходимости, как и любые исходные принципы.

Начнем с таких исходных методологических принципов и определений, которые имеют характер *философской спекуляции или постулата*. Весь последующий анализ является осмысленным только в рамках этих принципов, но мы не намерены *доказывать*, что сами принципы являются в каком-то смысле безусловно истинными и обязательными.

Диалектический материализм учит, что объективно реальным является то, что существует вне и независимо от нашего сознания. Это примерно соответствует интуитивному представлению о «самостоятельном существовании» некоторого объекта или сущности. С таким определением трудно не согласиться, и оно будет исходным пунктом нашего анализа. Но это определение имеет декларативный характер. Как практически проверить факт такого независимого существования? Можно ли формулировке придать ясный операциональный смысл?

Не претендуя на полноту исследования вопроса, мы сосредоточимся лишь на одном *достаточном* критерии реальности объектов. Имеется в виду следующий критерий:

Что объективно познаваемо, то объективно существует. (R)

Этот критерий также представляется интуитивно ясным. Действительно, если нечто допускает получение объективной и согласованной информации о себе, то непонятно, как такое могло бы быть, если бы это нечто не обладало самостоятельным независимым существованием. Не будем настаивать, что этот принцип (R) исчерпывает все возможные признаки объективной реальности. Для наших целей этого критерия будет достаточно.

Как следует из формулировки критерия (R), вопрос об объективной реальности объекта, по сути, сведен в нем к вопросу о смысле термина «объективно познаваемо». Мы стремимся придти к критериям объективного существования, имеющим ясный операциональный характер, но «объективная познаваемость» сама по себе этим свойством пока не обладает. Мы сформулируем два достаточных критерия (или, более мягко, признака) объективной познаваемости, которые могут быть поняты операционально, хотя могут и не давать исчерпывающего определения. Этого будет для нас достаточно.

Во-первых, «объективно познаваемо» то, что приводит к *воспроизводимому знанию*, – к знанию, которое может быть получено с использованием *воспроизводимых методов*. В этом случае разные исследователи могут прийти к одной и той же информации об интересующем объекте контролируемым способом, поэтому разумно считать, что эта информация имеет объективный смысл, не зависящий от самих субъектов, но зависящий от объекта, который, тем самым, объективно существует.

Подчеркнем, что когда речь идет о воспроизводимом *методе* познания, имеется в виду воспроизводимость именно метода, а не результата. Воспроизводимый метод легко может приводить и к невоспроизводимому результату. Так, например, тщательно описанная и воспроизводимая процедура измерения спина электрона с помощью установки Штерна-Герлаха приводит к невоспроизводимому в классическом смысле результату: электрон отклоняется магнитным полем установки то в одну сторону, то в другую (хотя в этом случае имеется воспроизводимость в ансамблевом смысле). То, что метод воспроизводим, означает, грубо говоря, что он может быть описан четкой инструкцией или программой, а его реализация может быть возложена (в принципе) на автомат, пусть идеализированный и очень совершенный. Определение воспроизводимой процедуры познания, апеллирующей к роботу или автомату, вовсе не подразумевает, что развитие науки может быть оставлено на усмотрение таких автоматов. Сами процедуры выдумываются людьми, здесь существенен творческий элемент, не имеющий алгоритмической природы. Если вместе с воспроизводимостью метода имеется и воспроизводимость результата, то можно говорить о том, что объект познаваем воспроизводимым методом, так как не только процедуру можно воспроизвести, но и результат ее будет одним и тем же.

Предполагается, что, в принципе, всегда существует способ убедиться в том, что информация действительно получена воспроизводимым методом определенного типа. Более того, предполагается, что способ проверки воспроизводимости может быть всегда реализован в виде некоторой финитной процедуры. Отсюда следует операциональность такого признака объективности полученного знания, так как, во-первых, упомянутая финитная процедура проверки метода всегда может быть до конца реализована, и, во-вторых, можно прямо проверить, приводит ли сам метод к воспроизводимому (с требуемой точностью) результату. В таком понимании операциональности имеется, конечно, элемент идеализации, так как воспроизводимость метода иногда невозможно проверить с абсолютной несомненностью, да и со сравнением результатов могут возникнуть похожие проблемы. Однако, в науке всегда приходится иметь дело с некоторыми идеализациями.

Вторым достаточным (но не необходимым) признаком объективности определенного знания является то, что оно в одном и том же или эквивалентном виде реально было получено независимо разными исследователями. Действительно, если бы соответствующий объект не существовал объективно, независимо от самих исследователей, как такое могло бы случиться? Однако, остается возможность того, что одно и тоже знание в разных головах возникает не в силу объективного существования соответствующего предмета, но в силу некоторого коллективного свойства, характеризующего человеческий ум как таковой. Более того, такие примеры, видимо, существуют. Это, например, представление о высшей трансцендентной сущности, лежащей в основе мира, которое возникало в разных частях света и в разных культурах вполне независимо, но со многими общими чертами. Чтобы исключить подобные артефакты разума, дополнительно мы потребуем, чтобы независимые акты познания были связаны также с воспроизводимыми методами познания. Иногда приходится слышать, что разного рода духовные практики (медитации, молитвы) являются воспроизводимыми методами, так как вполне определенные действия приводят к вполне определенным результатам. В нашем понимании воспроизводимости такие практики воспроизводимостью обладать не могут, так как их выполнение в принципе не может быть доверено автомату. В нашем понимании воспроизводимая методика должна быть в принципе реализуема чисто механически, алгоритмическим автоматом, как это уже было указано. Это принципиальный элемент определения воспроизводимости.

Здесь мы явно апеллируем к предыдущему признаку объективности, т. е. новый признак не является самостоятельным, но является лишь его усилением. Однако, как будет показано ниже, он важен и сам по себе, так как позволяет в отдельных случаях превратить этот критерий из достаточного – в необходимый и достаточный, и использовать его для построения процедуры опытного контроля объективного существования математических объектов.

Критерий «независимой открываемости» является операциональным в том смысле, что в каждом конкретном случае можно указать, было ли какое-то знание получено несколько раз независимо, или нет, и имели ли место такие случаи в рассматриваемой области знаний.

Для удобства дальнейших ссылок зафиксируем введенные признаки объективной познаваемости и, соответственно, объективной реальности в «квазиматематической» форме. Пусть A означает вещь, которая может быть объектом познания, ОбСущ(A), ОбПозн(A), ВоспрМет(A), НезОткр(A) есть предикаты, означающие, соответственно, «A объективно существует», «A объективно познаваемо», «A познаваемо воспроизводимыми методами», «A открыто независимо более одного раза». Тогда введенные выше признаки объективного существования объекта A имеют форму двойной импликации:

$$\text{ВоспрМет}(A) \Rightarrow \text{ОбПозн}(A) \Rightarrow \text{ОбСущ}(A) \qquad \text{(R1)}$$

$$\text{НезОткр}(A) \Rightarrow \text{ОбПозн}(A) \Rightarrow \text{ОбСущ}(A) \qquad \text{(R2)}$$

И, наконец, последнее общее замечание о критериях объективной реальности. Идея, согласно которой собственной реальностью обладает все то, что объективно познаваемо, вовсе не отменяет того, что возможны разные виды объективной реальности. Объективная реальность не обязана быть однородной. Однако мы решительно устраняем такой сорт реальности объектов, который можно назвать «потенциальным» в том смысле, что реальность находится в зависимости от того, имел ли место фактически акт познания в отношении этого объекта, или нет. Если, например, в какой-то момент времени был обнаружен некоторый далекий и интересный астрономический объект, то мы считаем, что этот объект вполне объективно существовал и до того, как мы его нашли и исследовали. Ничего «потенциального» в его существовании не было ни до его обнаружения, ни даже до появления нас самих как познающих субъектов и наблюдателей, если объект существовал и до нас. «Потенциальность» может характеризовать наше *субъективное отношение* к существованию каких-то объектов, но не это существование как таковое. Тонкий момент, связанный с понятием «потенциальной» реальности возникает при анализе квантовых измерений. Здесь наблюдаемые значения физических величин возникают только в результате акта измерения, поэтому, казалось бы, это тот случай, когда следует признать их «потенциальное» существование до измерения. Но одиночные квантовые измерения не дают воспроизводимого результата. Поэтому мы должны считать, что одиночное квантовое измерение хоть и воспроизводимо как процедура, но не приводит ни к какому объективному знанию из-за отсутствия воспроизводящегося результата. Поэтому ни о какой объективной реальности, связанной с одиночными квантовыми измерениями, говорить вообще нельзя – по крайней мере со строго операциональной точки зрения. Поэтому проблема «потенциальной» реальности снимается. Воспроизводимость результата, приводящая к объективному знанию, возникает только при ансамблевых измерениях в статистическом смысле, но ансамблевые измерения не приводят к проблеме «возникновения» наблюдаемых величин в процессе измерения, следовательно проблема «потенциальной» реальности в ансамблевых измерениях и не возникает. В квантовой объективной реальности нет ничего потенциального, но в обычной интерпретации квантовой механики относится эта реальность не к отдельным квантовым системам, а к ансамблям. В этом, собственно, и состоит специфика квантовой реальности.

2. Объективное существование мира математических форм

Мы теперь применим намеченный выше *общий* аппарат достаточных операциональных критериев объективной реальности, который никак специально не был привязан к анализу структуры математики, к непростому вопросу: обладают ли «самостоятельным» существованием абстрактные математические объекты, или они являются лишь продуктами нашего сознания (или продуктами культуры)?

Мы, конечно, не являемся первыми исследователями этой проблемы. Направление мысли, в котором математические объекты мыслятся как реально существующие, хорошо известно в философии математики под именем «математический реализм». Многие величайшие математики придерживались этой позиции: среди них Шарль Эрмит, Давид Гильберт, Анри Пуанкаре, Курт Гёдель. Для нас наиболее важна фигура Роджера Пенроуза [1-3], так как его аргументация ближе всего той, которой и мы будем придерживаться, но суждения некоторых других математиков тоже будут приведены. Он последовательно проводил эту идею в своих книгах о законах мышления и законах природы. Пенроуз обосновывал ее, используя ряд конкретных примеров «математических форм». Одним из излюбленных объектов Роджера Пенроуза является невероятно сложное множество (фрактал), открытое Бенуа Мандельбротом. Чтобы представить аргументацию Пенроуза о независимой реальности этого множества, лучше всего предоставить слово ему самому и привести довольно длинную выдержку из книги «Путь к реальности...» [3] (стр. 37): «Множество Мандельброта совершенно определенно не является изобретением человеческого разума. Оно просто объективно существует в самой математике. Если вообще имеет смысл говорить о существовании множества Мандельброта, то существует оно отнюдь не в наших с вами разумах, ибо ни один человек не в состоянии в полной мере постичь бесконечное разнообразие и безграничную сложность этого математического объекта. Равным образом не может оно существовать и в многочисленных компьютерных распечатках, которые пока только начинают охватывать некую малую толику его невообразимо сложно детализированной структуры, – на этих распечатках мы видим не само множество Мандельброта и даже не приближение к нему, но лишь бледную тень очень грубого приближения. И все же множество Мандельброта существует и существует вполне устойчиво: кто бы ни ставил перед компьютером задачу построения множества, каким бы ни был этот самый компьютер, структура в результате получается всегда одинаковая — и чем “глубже” мы считаем, тем более точной и детальной будет картинка. Следовательно существовать множество Мандельброта может только в платоновском мире математических форм, больше нигде.»

В приведенном фрагменте Пенроуз для аргументации обращается к здравому смыслу. Но в другом месте он дает так же и существенное уточнение своего понимания реальности математических структур: «Когда я говорю о “существовании” платоновского мира, я имею в виду всего-навсего объективность математической истины» («Путь к реальности...», стр. 35). Нетрудно видеть, что понимание «существования» у Роджера Пенроуза представляет собой, фактически, частный случай подхода к понятию объективного существования в общем случае, который был рассмотрен в предыдущем разделе.

С точки зрения нашего несколько более общего и более явно сформулированного подхода к понятию объективной реальности, основанного на общих достаточных и операционально определенных критериях, математические истины (или математические формы, по терминологии Пенроуза) определенно обладают собственной реальностью, так как, вне всяких сомнений, удовлетворяют обоим сформулированным нами условиям (R1) и (R2). Во-первых, они объективно познаваемы, так как получаются воспроизводимыми методами математических доказательств или вычислений (критерий R1) С формальной точки зрения любое доказательство можно представить как некоторое вычисление в специализированном формальном языке математической логики. Мы часто будем использовать слова «доказательство» и «вычисление» как синонимы.

Во-вторых, многие математические истины действительно открывались независимо разными исследователями (критерий R2). Забавным примером работы второго критерия реальности в отношении математики является обыкновенная контрольная работа по математике в школе: оценка работ учителем основана на вере в то, что все ученики, не списывая друг у друга, должны независимо прийти к одному и тому же правильному решению задачи, так как это правильное решение в мире математических форм объективно существует само по себе.

Таким образом, если исходить из критерия объективной реальности, основанного на объективной познаваемости объектов (R), мир математических форм существует совершенно объективно и независимо от сознания познающих его субъектов. Более того, это объективное существование имеет ясный операциональный статус уже только потому, что этим статусом обладают критерии (R1) и (R2). Это объективное существование ни в малейшей степени не является в чем-то ущербным по сравнению с объективным существованием объектов материального мира, оно ни в каком смысле не является «потенциальным». «Потенциальности» в существовании еще не открытого математического объекта не больше, чем «потенциальности» в существовании галактики, еще не занесенной в каталог. Точнее говоря, ни по каким формальным признакам объективное существование мира математических форм не отличается от объективного существования мира материальных объектов. В обоих случаях уверенность в объективном существовании основана на познаваемости объектов воспроизводимыми методами, и только природа методов кажется различной в отношении мира математики и материального мира. В первом случае это метод доказательств (вычислений), во втором случае это экспериментальный метод или наблюдения. Однако заметим, что вопрос о природе воспроизводимых методов вовсе не затрагивался нами при обсуждении признаков объективного существования, он не фигурирует в формулировке критериев (R), (R1), (R2), и действительно, не имеет отношения к делу. Важна только воспроизводимость методов познания как таковая.

Заметим однако, что даже если настаивать на необходимости рассмотрения вопроса о различии природы методов познания в математике и в отношении материального мира, то следует отметить, что различие между этими двумя группами методов не столь велико, как это может показаться. Описание любого воспроизводимого экспериментального метода включает перечисление действий, которые должны быть выполнены одно за другим, будучи линейно упорядоченными во времени, чтобы получить конечный результат. Эти действия, в принципе, могут быть выполнены и автоматом, как мы уже упоминали. И реально выполняются автоматами в огромном количестве случаев: как например, автоматическими космическими телескопами, на Большом адронном коллайдере и т. д. Но любое математическое доказательство или вычисление означает в точности то же самое. Вычисление есть процесс, который в принципе должен быть выполнен некоторым реальным физическим устройством шаг за шагом, будучи линейно упорядоченным во времени (точнее – последовательные шаги должны быть причинно связаны). Роль такого устройства могут играть мозги математика, но, в принципе, это может быть и автомат – машина Тьюринга или эквивалентное устройство (в том числе – привычные для нас компьютеры). Поэтому математическое доказательство, как определенная разновидность *метода познания*, может и должно рассматриваться как разновидность воспроизводимой *экспериментальной* процедуры.

Близость методов математики обычным экспериментальным процедурам стала еще более заметной с возникновением понятия квантового компьютера, квантовых вычислений, и с появлением первых экспериментальных прототипов этих устройств. Не вдаваясь в детали, отметим, что квантовое вычисление принципиально не может быть выполнено «на бумаге» или «в уме», но может быть реализовано только в виде некоторого физического (существенно квантового) процесса специальным устройством – квантовым процессором. При этом квантовый компьютер является по своей сути аналоговым, но не цифровым, устройством. Квантовый компьютер работает лишь с конечной точностью и всегда имеется неисчезающая вероятность получения ошибки. Квантовое вычисление ничем не отличается от других процедур экспериментальной физики (включая необходимость анализа «доверительных интервалов»), реальные прототипы квантовых вычислительных устройств и правда являются весьма сложными экспериментальными установками, но при этом все это принадлежит, все-таки, математике (например, это способ решения задачи разложения на простые множители очень больших целых чисел, которая принципиально недоступна классическим компьютерам и любым другим вычислительным методам). Даже если настаивать, что работа квантового компьютера и квантовые вычисления не являются чем-то вполне математическим, этот пример с полной очевидностью показывает, что граница между обычными экспериментальными методами и методами математики является крайне размытой.

3. Опытный контроль существования мира математических форм

Шарль Эрмит (1822-1901) писал: Цит. по: Н. Бурбаки [4] «Я *верю*, что числа и функции анализа не являются произвольными созданиями нашего разума; я думаю, что они существуют вне нас в силу той же необходимости, как и объекты реального мира, и мы их встречаем или открываем и изучаем точно так, как это делают физики, химики или зоологи» [курсив мой, А.П]. Отмечая исключительную ясность формулировки основной мысли и полностью к ней присоединяясь, хотелось бы, однако, внести одно уточнение в статус этой идеи. *Верить* в независимую реальность объектов математики не обязательно, так как ее можно *проверить*. Объективное существование мира математических форм имеет следствия, открытые для контроля опытом, и формулировка этих следствий такова, что они открыты и для фальсификации в смысле Поппера. Реальность мира математики имеет структуру проверяемого научного утверждения. Рассмотрим обоснование этого очень сильного утверждения.

Идею опытной проверки реальности мира математических форм можно усмотреть уже в комментариях Роджера Пенроуза по поводу реальности множества Мандельброта: «кто бы ни ставил перед компьютером задачу построения множества, каким бы ни был этот самый компьютер, структура в результате получается всегда одинаковая» (см. раздел 2). Это утверждение имеет форму *предсказания*, которое адресует неограниченный и неопределенный набор еще не проведенных вычислений; оно является *следствием* идеи об объективном существовании множества Мандельброта; и это предсказание можно *проверить*.

Уточним и обобщим эту мысль. Рассмотрим какой-нибудь математический объект, про который заранее понятно, что он является осмысленным, но некоторые его детальные *характеристики* могут быть и неизвестны. Это может быть некоторый еще не исследованный фрагмент множества Мандельброта (характеристика – конкретный рисунок множества); это может быть осмысленное утверждение, имеющее форму теоремы, но которая еще не доказана и не опровергнута (характеристика – ложь или истина); это может быть и что-то совсем простое, например миллиардный знак в десятичном разложении квадратного корня из 4711 (характеристика – цифра от 0 до 9). Из представления об объективном существовании мира математических форм следует, что значения таких характеристик существуют совершенно объективно и независимо от того, вычислял их кто-нибудь или нет. Это позволяет относительно таких характеристик сделать следующее *предсказание*: кто бы и каким бы методом ни взялся вычислять определенную характеристику, результат получится всегда один, так как он существует объективно и независимо до любого его практического вычисления. Совершенно очевидно, что это предсказание имеет форму, открытую для проверки опытом. Этот опыт состоит в сравнении результатов различных путей вычисления значений данной характеристики. Заметим, что существование неэквивалентных путей вычисления какой-нибудь характеристики в общем случае не вызывает сомнений: например, число π может быть вычислено с помощью различных рядов и бесконечных произведений, представлено интегралами нескольких разных типов, можно, наконец, воспользоваться методом Монте Карло. В пределах точности, обеспечиваемой методом, получится одно и то же. Даже тот факт, что 1+1=2, может быть проверен независимо в разных аксиоматических системах арифметики, соответствующее вычисление может быть проведено устройствами, работа которых основана на разных принципах (двоичные или десятичные, цифровые или аналоговые).

Очевидно также, что этот сорт предсказаний имеет форму, открытую для опытной фальсификации в смысле Поппера: достаточно предъявить два правильных вычисления, которые приводят к различным результатам, и объективное существование данной характеристики будет фальсифицировано. Но такой контрпример фальсифицирует объективное существование не только той характеристики, которая исследовалась, он делает и значительно больше.

Получение двух различных результатов с помощью различных, но правильных логических выводов, называется противоречием. Это означает, что в рассматриваемой системе для некоторого осмысленного утверждения *A* можно одновременно доказать *A* и *не-A*. Это означает противоречивость не только утверждения *A*, но и всей системы, в которой производился данный вывод, так как в системе, в которой можно хотя бы для одного утверждения *A* доказать одновременно *A* и *не-A*, можно доказать любое утверждение, которое вообще можно сформулировать (это теорема математической логики). Такая система с практической точки зрения является совершенно бесполезной, и это означает также, что никакие «истины» или математические формы такой теории никаким объективным существованием не обладают, так как им невозможно приписать никаких определенных значений. Единственный контрпример фальсифицирует объективное существование всего того фрагмента мира математических форм, который опирается на теорию или формальную систему, в которой был получен данный противоречивый результат.

Закономерен вопрос: не является ли полученная форма фальсифицируемости в каком-то смысле тривиальной или тавтологичной? В том, например, смысле, что математика на самом деле является непротиворечивой (в противном случае она была бы бесполезной), поэтому попытка фальсифицировать ее *a priori* обречена на неудачу, и утверждение о фальсифицируемости утрачивает содержательный смысл: объективное существование мира математических форм тавтологично нефальсифицируемо.

На это мы приведем два возражения.

Первое возражение. Фальсифицируемость по Попперу есть требование только к *форме* следствий, вытекающих из теории. Научные утверждения должны приводить к таким следствиям, для которых в принципе можно содержательно описать ситуацию, когда следствие отвергается опытом. И это требование вне всяких сомнений выполнено для гипотезы о реальности мира вычислимых математических форм: если предъявлено два правильных вычисления с различными результатами, то предсказание того, что результат должен быть один, так как существует объективно, недвусмысленно опровергнуто. Для действительно вненаучных «теорий» следствия не могут иметь даже такой формы. Например, из утверждения о существовании Бога нельзя вывести следствий, даже форма которых допускала бы фальсификацию.

Второе возражение состоит в том, что непротиворечивость мира математических форм на самом деле отнюдь не имеет тривиального характера. По этому поводу в первой книге фундаментального трактата по математике Н. Бурбаки [5] написано «Итак, мы верим, что математике суждено выжить и что никогда не произойдет крушения главных частей этого величественного здания вследствие внезапного выявления противоречия; но мы не утверждаем, что это мнение основано на чем-либо, кроме опыта». Напомним, что правильность вычисления всегда может быть установлена с помощью финитных алгоритмических процедур. Причем, добавим, что понимание опыта здесь весьма близко к пониманию опыта в экспериментальных научных дисциплинах: это применение раз за разом определенных процедур с неизменным вопросом: а что получится? Попытка обнаружить противоречие в математике и, вместе с тем, фальсифицировать объективное существование мира математических форм, является содержательно осмысленной, так как непротиворечивость математики в целом не доказана. Более того, опыт обнаружения противоречий в математике имеется: это случилось, например, в наивной канторовской теории множеств в начале 20-го века. Оказалось, что основная для теории множеств идея, согласно которой любое осмысленное свойство определяет множество объектов, обладающих этим свойством, приводит к противоречию. Тогда, правда, противоречие удалось устранить за счет более аккуратной формулировки теории, и математика в целом устояла, хотя потрясение было велико.

В утверждении о недоказанности непротиворечивости математики имеются детали, которые требуют уточнения. В отношении некоторых чрезвычайно обширных разделов математики непротиворечивость не только не доказана, но, в определенном смысле, не может быть доказана в принципе. Это следует из второй теоремы Гёделя о неполноте, которая выполняется для любой математической теории, содержащей формальную арифметику, для теорий, содержащих аксиоматическую теорию множеств (например, в виде системы аксиом Цермело-Френкеля) и для любых разумных обобщений этих теорий [6]. Вторая теорема Гёделя о неполноте утверждает, что непротиворечивость системы не может быть доказана внутри самой системы ее собственными средствами, если система действительно непротиворечива. Так как формальная арифметика является основой теории рациональных чисел, рациональные числа являются основой системы вещественных чисел а те, в свою очередь, основой большинства других числовых систем и анализа, то под вопросом оказывается непротиворечивость всей математики, работающей с числовыми системами. Теория множеств, в свою очередь, прямо включена во многие абстрактные математические дисциплины, такие как топология, теория групп и т. д., поэтому непротиворечивость всех этих областей математики так же не доказана. Все упомянутые системы вместе составляет бóльшую часть математики.

Между тем, теоремы Гёделя о неполноте выполняются не для всех математических систем. Точнее, существует целый ряд теорий, непротиворечивость которых доказана до конца простыми и строго финитными методами. Так, например, в математической логике доказана непротиворечивость исчисления высказываний (пропозициональное исчисление) и исчисления предикатов первого порядка [6] (последнее обстоятельство тесно связано с известной теоремой Гёделя о *полноте*). Доказана непротиворечивость ограниченной арифметики без умножения (система Пресбургера) и непротиворечивость ограниченной арифметики с умножением, но без правила индукции или с некоторыми ограничениями на правило индукции (см. по этому поводу классическую книгу Стефена Клини [8], стр. 184, 389). Поэтому попытки фальсифицировать эти теории путем поиска противоречий обречены на неудачу. Противоречий в них заведомо нет. Это означает, что на неудачу обречены и попытки фальсифицировать объективное существование вычислимых математических объектов этих теорий. Означает ли это, что объективное существование объектов этих теорий является тривиально нефальсифицируемым? Нет, ни в коем случае не означает. Напомним наше *Первое возражение* (см. выше): фальсифицируемость относится только к форме следствий из некоторой теории, но никак не к тому, возможна ли фальсификация «на самом деле». Теория должна быть открыта для контроля опытом по форме своих следствий, и не более. В конце концов, если некоторая теория истинна *на самом деле*, то фальсифицировать ее *на самом деле* невозможно, но это вовсе не мешает быть ей фальсифицируемой в обычном смысле. Ситуация, когда непротиворечивость некоторой математической теории доказана очевидными финитными средствами, означает следующее: здесь мы в действительности имеем такое доказательство объективного существования объектов этой теории, которое уже невозможно опровергнуть. Мы можем быть уверены, что все непротиворечивые объекты этой теории объективно существуют. Иными словами, мы имеем такие фрагменты мира математических форм, объективное существование которых доказано средствами математики. Но для других фрагментов мира математических форм объективное существование еще не доказано или даже не может быть доказано в принципе (по второй теореме Гёделя), но открыто для опытной проверки и фальсификации. Объективный мир математики неоднороден в отношении уверенности в его объективном существовании в той же степени, в какой он неоднороден в отношении уверенности в его непротиворечивости.

Собственно, непротиворечивость математической теории и объективное существование объектов этой теории эквивалентны. В этой эквивалентности нет ничего тривиального. Это понимал еще Давид Гильберт, и эта мысль была основой мотивации его программы доказательства непротиворечивости математики путем превращения ее в чисто формальную текстовую систему. По этому поводу Н. Бурбаки пишет: [4] «Он [Гильберт] выставил новый принцип, вызвавший многочисленные отклики: в то время как в традиционной логике непротиворечивость некоторого понятия делала его лишь возможным, для Гильберта непротиворечивость некоторого понятия (по крайней мере для математических понятий, определенных аксиоматически) эквивалентна его существованию. В связи с этим возникла необходимость доказывать a priori непротиворечивость некоторой математической теории еще до начала ее систематического развития». Иными словами, Гильберт стремился получить уверенность в существовании объектов изучения, прежде чем начать их изучать. Причем его понимание существования, как видно, практически тождественно пониманию объективного существования мира математических форм в настоящей статье или у Рождера Пенроуза и явно противопоставляется «возможности» или «потенциальности».

Есть еще одна тонкость, имеющая отношение к фальсифицируемости объективного существования математических объектов, которую нельзя не упомянуть. По первой теореме Гёделя о неполноте (не путать со второй, которую мы упоминали выше) некоторые системы (формальная арифметика, теория множеств) содержат истинные утверждения, которые, однако, невыводимы в данной системе. Они называются Гёделевскими утверждениями. Непротиворечивость Гёделевских утверждений в общем случае закрыта для опытной проверки в описанном выше смысле, так как невозможно построить ни одного чисто формального доказательства такого утверждения, следовательно невозможно сравнить и результаты различных доказательств, что только и открывает возможность получить противоречие. Следовательно, Гёделевские утверждения, вообще говоря, закрыты для прямой фальсификации, поэтому смысл «объективного существования» для истинности таких утверждений требует более тонкого анализа, чем мы проводили до сих пор. Мы здесь не будем пытаться выстроить такой более тонкий анализ, но отметим, что существование этих патологических объектов, независимо от нашего отношения к ним, ни в малейшей степени не бросает тень на фальсифицируемость объективного существования мира математических форм в целом. Дело в том, что кроме таких объектов в мире математических форм определенно существуют чрезвычайно обширные фрагменты, в отношении которых открытость утверждения об их объективном существовании для контроля опытом и для фальсификации не вызывает сомнений, как мы объяснили это выше (фактически, речь идет о всех так называемых вычислимых объектах). Именно в отношении этих фрагментов утверждение об объективном существовании имеет совершенно четкий смысл и является проверяемым, независимо о более трудного вопроса, связанного с Гёделевскими утверждениями.

Идея об объективном существовании мира математических форм позволяет получить еще одно любопытное следствие, которое, в принципе, тоже открыто для опытной проверки и фальсификации. Если математические истины существуют объективно и независимо от нас, то они должны быть по необходимости переоткрыты *инопланетными цивилизациями*, достигшими как минимум уровня космических технологий (если такие цивилизации существуют). Связано это просто с тем, что развитие высоких технологий без математики кажется совершенно невозможным, при этом другая цивилизация должна пройти *весь* путь построения математики независимо от нас, и *все* результаты должны были быть получены независимо о нас. Но все эти результаты уже существуют независимо от кого бы то ни было в объективном мире математических форм, поэтому другая цивилизация найдет в точности то же, что и мы. Здесь, конечно, есть свои тонкости. Так, например, инопланетяне могут продвинуться в изучении высших абстрактных разделов математики меньше или больше чем мы, но в отношении некоторых базовых разделов математики, таких, как евклидова геометрия и основы анализа, результаты должны быть общими для всех. На этом уровне понимания критерий независимости получения информации в отношении мира математических форм (R2) превращается из достаточного критерия объективности, который имеет только философское обоснование, в необходимый, открытый контролю опытом. В этом качестве критерий (R2) перемещается из области философии в область естественных наук. Если другие цивилизации вообще существуют и когда-нибудь будут обнаружены, но окажется, что они не имеют ничего похожего на нашу математику, достигнув при этом высокого уровня технологического развития, то «реальность математических форм» будет фальсифицирована. Мир математических форм окажется артефактом цивилизации людей. Это другой, независимый путь фальсификации по сравнении с тем, который был связан с анализом непротиворечивости математики (см. выше). Тонким моментом этого нового пути фальсификации является то, что на самом деле неизвестно, существуют другие цивилизации, или нет. По нашему мнению, это несущественно, так как фальсифицируемость в смысле Поппера относится только к форме следствий, как это мы уже объясняли выше. Нужно, чтобы ситуация, в которой происходит опытное опровержение следствия теории, могла быть содержательно описана. Это определенно имеет место в данном случае. Напомним, что существуют «теории», для которых такие ситуации не являются даже мыслимыми.

Итак, наш вывод состоит в том, что объективная реальность представлена не только объективной реальностью материального мира, но и объективной реальностью совершенно иного рода – объективным миром математических форм. Причем реальность мира математических форм не должна рассматриваться как предмет веры или даже как философский постулат, так как допускает опытный контроль с помощью ясных операционально определенных процедур и фальсификацию в смысле Поппера. Тем самым утверждение об объективном существовании математических объектов принадлежит науке, но не философии. Это очень сильно отличается от распространенной точки зрения на платонизм в математике. «Математики-платонисты отрицают возможность ошибочности арифметики Пеано. Вслед за Кронекером многие считают, что натуральные числа открыты им путем прямого прозрения, что гарантирует их существование» - пишет Брайан Дэвис в статье «Куда движется математика?». [9]. Напротив, мы утверждаем, что безгрешность арифметики Пеано, равно как существование натуральных чисел и платоновской математической реальности вообще, является опытным фактом, оставляющим место сомнению, не имеющим ничего общего с верой, причем характер упомянутого опыта мало чем отличается от опыта естественных наук (но не тождествен ему).

Библиографический список использованных источников

1. Пенроуз Рождер. Новый ум короля. (2-е изд.) / Рождер Пенроуз. – М.: УРСС, 2003.

2. Рождер Пенроуз. Тени разума. / Рождер Пенроуз. – М.-Ижевск. Институт компьютерных исследований, 2005.

3.Путь к реальности, или законы, управляющие Вселенной. Полный путеводитель. / Рождер Пенроуз. – М.-Ижевск. Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007.

4. Бурбаки Н. Очерки по истории математики. / Н. Бурбаки. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1965, – С. 29.

5. Бурбаки Н. Теория множеств. / Н. Бурбаки. – М.: Мир, 1965, – С. 30.

6. Новиков П.С. Элементы математической логики. / П.С. Новиков. – М.: Наука, 1973, – С. 108, 209.

7. Коэн К.П. Теория множеств и континуум-гипотеза. / К.П. Коэн. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ» (URSS), 2009. Гл.I, § 10.

8. Клини С.К. Введение в метаматематику. / С.К. Клини. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1957

9. Davies Brain. Куда движется математика? / Brain Davies // Notices of the American Mathematical Society. Notices of the American Mathematical Society. – 2005. vol. 52, №11, P.1350-1356.

УДК 004.03; +530.1
Р.Б. Сейфуль-Мулюков, д-р геол.-минерал. наук, профессор
Институт проблем информатики РАН, г. Москва, Россия
Rust@ipiran.ru

ТЕОРИЯ ИНФОРМАТИКИ И ПРИЛОЖЕНИЯ ЕЁ ЗАКОНОВ ДЛЯ ПОЗНАНИЯ СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

В конце 50-х годов XX столетия после публикации математической теории связи К.Шеннона и внедрением ЭВМ в сферы деятельности общества, стало ясно, что информация наряду с повседневным, исторически сложившимся представлением как informatio (лат) сообщение, данные, сведения, имеет более широкий смысл. Изучение информации как фундаментального феномена и особенностей практического применения информации стало обособляться в самостоятельную научную дисциплину. В последующие годы в англоязычных странах стал применяться термин Information Science для её названия. В СССР с 1968 г., а затем в России утвердился термин «Информатика».

Основой теории информатики является феномен «информация», природа которого впервые всесторонне рассмотрена А.Д.Урсулом [1968]. В основе теории информатики лежат математические, физические, кибернетические и философские законы, доказывающие, что «информация» отражает одно из фундаментальных свойств материи. Поэтому, знание законов и средств информатики имеет большое значение при изучении материальных сложных, природных систем.

“Информатика” как термин для обозначения новой самостоятельной научной дисциплины, впервые появился в Европе. В Германии его ввел К.Штейнбух [Steinbuch -1957). Во Франции Ф. Дрейфус [Dreyfus -1962] предложил термин Informatique как название Общества прикладной информатики (Societe d`Informatique Applique - SIA). В том же году Ф. Байер [Bauer -1962] в США создал Американскую Ассоциацию информатики, Informatics Inc., которая существовала до 1985 года. На термин informatics претендовала ACM (Association for Computing Machinery), крупнейшая в мире профессиональная ассоциация компьютерных специалистов, с целью заменить им слова Computing Machinery в названии ассоциации, но получила отказ от Informatics Inc. В 1962 г. в США был создан первый факультет информатики в университете Пердю.

В США широко применяются термины Computer Science и Computational Science. Они обозначают дисциплины широкого спектра математических инструментов, технических средств и сетевых технологий, позволяющих оптимизировать *сбор, хранение, поиск, обработку преобразование, использование* и другие операции с информацией. Соотношение Computer Science и Computational Science с дисциплиной «Информатика» в шутливой форме определил выдающийся нидерландский ученый Э. Дейкстра: «Информатика не более наука о компьютерах, чем астрономия – наука о телескопах».

Легенда об образовании самого термина гласит, что в основе четырех лингвистических и смысловых его аналогов - informatik (нем), informatique (франц), informatics (анг) и информатика (рус), лежит сочетание на соответствующем языке первой части слова ***информа***ция и второй части слова автома***тика.*** Создатели лингвистического гибрида, соединили в один термин названия дисциплин, обозначающих *сбор*, накопление, *обработку, хранение, классификацию, распространение, поиск, использование* и другие процедуры и действия, с данными, информацией и знаниями, средствами автоматизации, компьютера и информационных технологий. Фундаментальные качества информации как свойств материи, остались вне пределов этой дисциплины.

Термин Information Science, широко применяется пользователями англоязычных стран и тематика этой дисциплины, частично пересекается с тематическими спектрами информатики, рассмотрим её содержание. Дословный перевод Information Science на русский язык звучит как «Наука об информации». Н. Борко [Borko - 1968, с. 3], одним из первых предложивших название Information Science, дал следующее её определение: «Наука об информации изучает свойства и поведение информации, механизмы управления её потоками, средства обработки для оптимизации доступа к информации и её использования. Она имеет дело с частью знаний связанной с *созданием, сбором, организацией, хранением, интерпретацией, передачей, трансформацией и использованием* информации» (выделение курсивом наше).

Утвердившееся содержание дисциплины Information Science отражает историю развития представлений о том, что есть информация. В течение тысячелетий до появления письменности устная информация о природных явлениях, исторических и религиозных событиях хранилась в памяти и передавалась поколением в поколение, являясь частью исторической памяти живого [Гринченко - 2004]. С появлением носителя информации (камень, папирус, кожа, береста, бумага и др.) возникла необходимость хранения носителя и классификации информации. Рождение письменности положило начало библиотековедению как первой науки, связанной с Information Science.

С начала XX века разнообразие и количество хранимой и передаваемой информации, и её носителей, увеличивалось настолько, что потребовало вмешательства математиков, которым смысл передаваемой информации не важен. Это позволило ввести в науку об информации такие объективные, абстрактные категории кибернетики и математики как *множество, неопределенность* и *вероятность*. Появилась статистическая теория информации и количество информации впервые математически выразил Р. Хартли [Hartley - 1928] и затем К. Шеннона [Shannon - 1948] в своей знаменитой формуле. Было доказано, что количество информации можно выразить логарифмической функцией, как *множество*, число элементом в котором есть степень *неопределенности* с *вероятностью* выбора одного, нужного элемента. Математическое выражение информации это количество информации, выражающее степень снятой неопределенности. Поскольку формула Шеннона повторила формулу Больцмана, предложенную им для энтропии в термодинамике (мера хаоса, беспорядка), то мера энтропии в теории информации отожествилась со степенью неопределенности и была названа информационной энтропией Шеннона.

Основание логарифма два в формуле Шеннона позволило использовать элементарную единицу – «бит», аналогичную бинарной единице кодирования текстов, уже применявшуюся в системах связи (плюс – минус, да – нет, точка – тире). Это было не только математическое, безотносительное к содержанию, исчисление информации, но и введение единицы её измерения, которой можно выразить количество и содержание информации. По существу это и есть математическая основа информатики.

Методы математической статистики, лежащие в основе статистической информации. Математическая статистика применимы к любому статистическому множеству объектов, явлений, предметов, вещей и информации, которые можно выразит кодами - битами (байтами, мегабайтами, гигабайтами и т.д.). В таком формализованном виде их можно передавать, принимать и хранить. При необходимости их можно декодировать и преобразовать в первоначальную форму синтаксической или цветовой информации и совершать другие операции. Первоначальное, историческое понятие информация (informatio), по мере развития методов информационных, компьютерных технологий *передачи, хранения, поиска, извлечения* информации и знаний утвердилось в таких общепринятых понятиях как: data base, data mining, information retrieval, knowledge management и многие другие. Information Science, Computer Science и Computational Science со всеми практическими приложениями развиваются быстрыми темпами и научные достижения, особенно в компьютерных технологиях обработки информации, внедряются в практику производственной, общественной и иной деятельности и персональной жизни людей. За более чем 60 лет прошедших с времени создания Шенноном математической теории информации были разработаны её многочисленные приложения, для самых различных областях науки и техники.

В теории информатики, интерпретация информации только как снятой неопределенности, не раскрывает полностью само понятие информация как одно из фундаментальных свойств материального мира, поскольку нет ясного описания её физической основы. Изучение основы феномена «информация» с точек зрения физики и философии и познания роли информации в организации природных, в частности биологических структур, началось задолго до введения термина информатика и признания науки об информации (Information Science). Представление об информации как фундаментальной категории постигалась по мере исследования материи на атомном и субатомном уровнях, а также строения сложных природных биологических систем.

Понятие об атоме и молекуле было принято в 1860 г на Международном съезде химиков. В 1897 г. введено понятие электрон, а в 1924 г. установлены его волновые свойства. В 1932 г. был определен нейтрон, а в 1960 г. протон вместе с их корпускулярными характеристиками и волновыми свойствами [Ишханов и др. - 2000]. Создалась основа знаний о строении атома, его ядра и электронных орбиталей, и их информационной характеристики.

Представление о субатомном строении вещества складывалось позднее, однако также до того как появились дисциплина «информатика» и Information Science. В его основе было изучение, элементарных частиц, которые считались возбужденным состоянием вакуума. Предсказанные теоретически и частично позднее установленные частицы Бозе (фотоны, гравитоны, глюоны и мюоны) переносящие свет, гравитацию и цвет, обладающие только волновой функцией. Для обоснования теоретической информатики более значимо открытие частиц Ферми – фермионов (кварки и лептоны) из которых состоят протоны и нейтроны, информационные характеристики которых вычислены точно.

Основополагающей идеей физических основ информатики можно считать гипотезу, высказанную в 1900 г М.Планком о квантовом характере поведения элементарных частиц, однако непосредственное отношение к информатике имеет открытие В.Гейзенбергом [Heisenberg – 1957] фундаментального закона микромира: кинематики и динамики элементарных частиц, т.е. – квантовой теории поля. Л.Бриллюэн [Brilluen – 1956] введя понятие «связанная информация» (bound information), как некоторого состояния физической системы, сопоставил его с термодинамическим состоянием или энтропией, оцениваемой конкретной физической величиной, что позволило оценивать информацию определенными физическими величинами. Значение волновой функции элементарных частиц для понимания их информационной характеристики было определено А. Цейлингером [Zeilinger – 1999].

Учитывая свойства и особенности поведения элементарных частиц в квантовом поле, и применив, по существу информационный подход, он объяснил физическую природу квантовой механики и предложил бит как наименьшее количество информации, которое несет элементарная система, представляющая только одно правильное утверждение. При этом под утверждением он понимал нечто установленное и подтвержденное результатами эксперимента и непосредственного наблюдения [Zeilinger - с. 635]. Поскольку поведение электрона и протона в квантовом поле определено наблюдениями и расчетами, их подобно истинному утверждению Цейлингера, можно считать элементарной системой и по спинам их волновой функции рассчитать объем информации атома любого элемента, а следовательно, и информационное содержание вещества ими составленного и его изменения на различных этапах химического, термического, каталитического и иного преобразования.

Результаты изучения субатомного и атомного строения материи физическими методами и математическими вычислениями и установленные её информационные характеристики, определяют информацию как фундаментальное свойство материального мира, и обосновывают информационную единицу – «бит», применимую для измерения объёма информации физических систем.

Вышеизложенное показывает что *неопределенность*, *вероятность* и *множество* как понятия математики, физики, кибернетики и квантовой механики явились основой для математического и физического обоснования информации как феномена существующего вне нашего сознания и, бита в качестве универсальной единицы её измерения. На познание феномена информация и обоснования теории информатики большой вклад внесли исследования связи между информацией и такими понятиями как *разнообразие*, *сложность* и *организация*.

Эти понятия имеют более широкий смысл и раскрывают свойства и особенности строения объектов в биологии, геологии, философии, в топологии и других фундаментальных науках и связь этих свойств и строения с информацией.

Неотделимость понятий *разнообразие* и информация впервые показал У.Эшби [Ashby -1956] и в более широком философском плане А.Урсул [1968]. Эшби количество информации приравнивал количеству разнообразия. Разнообразие можно представить как число различных элементов (аналогично с числом истинных утверждений Цейлингера) и как логарифм этого числа элементов (например, по основанию два, как это в формуле Шеннона). В этом случае логарифм с основанием два это средство преобразования множества, состоящего из разнообразных элементов, в количество информации этого множества выраженное в битах. На основании своих представлений об информации как разнообразии Эшби вывел закон необходимого разнообразия, названный его именем и играющего ключевую роль в познании строения и развития сложных систем.

Работа А.Д.Урсула [1968] это уникальное в науке о информации, обобщение знаний о феномене «информация» с философской, математической, физической и биологической точек зрения. Этому всестороннему обобщению почти полвека, но оно остаётся современной сводкой по теории информатики.

В биологии возможность определения информационного содержания молекул биологических структур появилась при отожествлении совокупности молекул с неким множеством, имеющим топологическую структуру. Первым исследователем связи понятий «множество» и «топология структур», был Н.Рашевский [Rashevsky – 1955]. Биологические функции простейших организмов или отдельных структурных единиц организма он представил в виде топологического пространства – графа и исследовал его информационное содержание. Э.Тракко [Trucco – 1956] определил информационное содержание графа, состоящего из вершин и соединяющих их ребер. Количество ребер исходящих из вершины определяет степень вершины, а количество информации в топологии это отношение общего количества вершин графа к количеству вершин с различной степенью (топологически не тождественных). Это отношение выражает логарифмическая функция. Взяв за основание логарифма число два Тракко, пришел к формуле количества топологической информации, практически аналогичной формуле информационной энтропии Шеннона.

Использование графа для оценки объема информации оказалось особенно плодотворным при изучении структуры молекул веществ, валентные связи химических элементов которых могут отожествляться со степенью вершин графа, а сами вершины с атомами элементов. Исследования в этом направлении ведутся в фармакологии и об их уровне можно судить по работе М, Дехмера с соавторами [Dehmer и др. 2010]. Положения топологической информации - еще одно обоснование теоретической информатики и доказательство её фундаментального характера.

Роль информации в *организации* биологических структур впервые исследовал Г. Кастлер [1967]. Он исходил из того, что клетка это высокоорганизованная система, состоящая из $2*10^{11}$ атомов и содержащая $5*10^{12}$ бит информации. В многоклеточном организме каждая клетка абсолютно функциональна и если она перестает быть частью целого, то целостность информации организма нарушается и сохраняется только информация отдельных атомов. Кастлер считал ген уникальной комбинацией молекул биополимеров, в виде кода, определенной конфигурации ДНК и РНК. Информация это код передаваемый из поколение в поколение. Заслуга Кастлера не только в установлении роли информации в организации множества высокоорганизованных, функциональных, биологических структур, но и существования в этих множествах не вероятностных методов снятия неопределенности или создания информации. Это дополняло идеи Рашевского и Тракко о природе и видах информации.

Математические, физические законы и положения биологи, квантовой механики и философии, обосновывающие фундаментальный характер информации, расширяют понимание этого феномена за границы традиционно сложившихся представлений на информацию как товар имеющего стоимость. Из признания информации как фундаментального свойства материи следуют два положения важных для изучения природных систем, в частности проблемы генезиса природных углеводородов

1. Бит это не только единица статистической информации, имеющая физическое смысл и математическое выражение. В битах можно подсчитать объём передаваемой и хранимой информации в традиционном смысле, и объём информации атома любого химического элемента, а следовательно, и любого сложного химического вещества, составленного молекулами, т.е. совокупностью атомов различных элементов.

2. Объём информации в битах отражает степень сложности, организации, разнообразия системы. Регрессивное убывание объёма информации или прогрессивное его нарастание отражают эволюцию развития системы соответствующим изменением объёма информации (информационной энтропии).

Возможности, которые открывает теоретическая информатика и использование бита как единицы измерения объёма информации физических систем, можно показать на примере образования и эволюции сложной природной системы нефти, состоящей из более 500 углеводородных веществ названных углеводородными последовательностями. В монографии, Р.Сейфуль-Мулюкова [2012] показано, что состав и структура нефти, определяют её статус как сложной системы. Приведен критический анализ гипотезы её происхождения из жировых (липидных) остатков животных, микробов, наземных и морских растений. В данной статье показано, что объём информации, как одно из фундаментальных понятий информатики и единица его измерения бит, позволяет обосновать принципиально новую гипотезу образования нефти из атомов углерода и водорода, возникших в недрах мантии Земли и достигающих сложности углеводородных молекул в земной коре в результате сложных каталитических преобразований.

Оценка объёма информации нефти и газов основана на том, что молекула газа, химический состав которого выражен брутто формулой и условная молекула нефти, выраженная эмпирической формулой, состоят из атомов. Информация любого атома, а следовательно и информация молекулы может быть измерена в битах [Гуревич -2007]. Следуя представлениям Н.М. Амосова [1964] о классификации количества информации определенного качества как показателя уровня развития материи, процесс образования нефти можно рассматривать как иерархическую пирамиду на каждом более высоком уровне, которой формируются более сложные углеводородные последовательности, с большим разнообразием и большим объёмом информации.

Методика подсчета объёма информации в углеводородах, составляющих нефть, и в структуре её условной молекулы, представлена в монографии [Сейфуль-Мулюков - 2010, с. 131-142]. При этом учтены как объемы информации атомов отдельных углеводородов (статистическая информация), так и объемы информации структуры их молекул (топологическая информация). В таблице 1 приведены объёмы информации углеводородов, последовательно образующихся на этапах генезиса углеводородных последовательностей от атомов углерода и водорода до нефти. Нижние строчки таблицы показывают объём информации атомов углерода и водорода, атомы которых приобретают нормальную ядерно-орбитальную атомную конфигурацию в верхней астеносфере [Фомин – 2009].

Изменение объёма информации по модели неорганического синтеза нефти (каталитическое преобразование простейших углеводородов)

Таким образом, динамика изменения объёма информации в единице условной массы вещества (атома или молекулы), от начальных стадий образования простейших углеводородов до конечной стадии в виде полной совокупности углеводородных последовательностей - нефти и, наконец, в битуме битуминозной породы, четко отражается в последовательном увеличении объёма информации во вновь образующихся более сложных углеводородах. Изменение объёма информации позволяет считать, что процесс образования нефти начинается на глубинах верхней астеносферы, на которых возникают исходные атомы углерода и водорода. В осадочной оболочке земной коры, простейшие углеводороды с объёмом информации не превышающим 550 бит, в результате каталитических преобразований, трансформируются в более сложные углеводородные соединения нефти, что четко показал Жармен [Germain - 1969]. Они и формируют залежи жидких углеводородов.

Таблица 1 – Объёмы информации углеводородов

Химический элемент, углеводород	Формула (химическая, брутто или эмпирическая)	Объём информации. (бит)
Битум	$C_{45}H_{51}O_2SN$	6219
Нефть (тяжелая)	$C_{37}H_{62}SN$	5228
Нефть (легкая)	$C_{32}H_{66}OSN$	4862
Бутан	C_4H_{10}	547
Пропан	C_3H_8	424
Этан	C_2H_6	289
Метан	CH_4	154
Углерод	C	109*
Водород	H	10*

* по данным И.М.Гуревича [2009, с. 46]

Основной этап формирования нефти с объёмом информации условной молекулы 4862 бита происходит в земной коре, в термодинамических условиях, обеспечивающих их каталитические преобразования, взаимные переходы и сохранение. Формирование нефти заканчивается в залежи, в микросостоянии минимальной энтропии, соответствующем наивысшей степени сложности, разнообразия и максимального объёма информации. С этого состояния система нефти начинает увеличивать энтропию, т.е. разрушаться и её жизненный цикл заканчивается в приповерхностных слоях земной коры, в которых нефть превращается в битум битуминозных пород. Подобный процесс полностью исключает мнение о возможности нефти сохраниться в недрах неизменной в течении сотен миллионов лет и соответствует закономерности развития материи во Вселенной, установленный В.А.Амбарцумяном [Амбарцумян – 1960] «….Материя развивается от простого к сложному, от более плотного к менее плотному состоянию».

Заключение

Фундаментальный характер информации выражает одно из основных свойств материального мира.. Единицей измерения объёма информации физических систем, как и количества информации в системах связи и коммуникации является бит. Теория информатики является связующим звеном всех разделов информатики. Их связывает физические квантомеханические законы строения и поведения элементарных частиц атомов, биологические законы строения и функционирования сложных биологических систем и философское обоснование информации как диалектического единства понятий *множество, неопределенность, вероятность, разнообразие, сложность и организация*.

Использование методов и средств теории информатики и единицы измерения количества информации бит позволило обосновать, новый подход к познанию природы сложных природных систем на примере нефти. Это дает возможность изучать не только природный углеводородные вещества, но и природные системы, сложенные атомами других элементов, например каменной соли - NaCl, или углерода, например каменный уголь – С не основываясь a-priory на общепринятых, тривиальных догмах, что соль образовалась в результате осаждения из вод мирового океана, а уголь из целлюлозы каменноугольных деревьев.

Библиографический список использованных источников

1. Амосов Н.М. Мышление и информация / Н.М. Амосов // Проблемы информации в современном мире. Мысль. – М, 1964. – С. 389

2. Амбарцумян В.А. (1960) Научные Труды. / В.А. Амбарцумян. – Изд. АН Арм. ССР. – т 2.

3. Гуревич И.М. «Законы информатики – основа строения и познания сложных систем». Издание второе уточненное и дополненное. / И.М. Гуревич – М.: «Торус Пресс». 2007. 400 с.

4. Гуревич И.М. Информационные характеристики физических систем./ И.М.Гуревич.– М.: «11-й ФОРМАТ», М. «Кипарис». Севастополь. – 2009. – 170 с.

5. Гринченко С.Н. Системная память живого. / С.Н. Гринченко. – М:, МИР, ИПИРАН, 2004. – 480 с.

6. Ишханов Б.С., Кэбин Э.И. Физика ядра и частиц. / Б.С. Ишханов, Э.И. Кэбин; – М:. XX век, 2000. – 210 с.

7. Кастлер Г. Возникновение биологической организации. / Г. Кастлер. – М: Мир, 1967. – 180 с.

8. Сейфуль-Мулюков Р.Б. Нефть – углеводородные последовательности, анализ моделей генезиса и эволюции / Р.Б. Сейфуль-Мулюков. – М: 11 формат, 2010. – 175 с.

9. Сейфуль-Мулюков Р.Б. Нефть и газ, глубинная природа и её прикладное значение / Р.Б. Сейфуль-Мулюков. – М: Торус ПРЕСС, 2012. – 217 с.

10. Урсул А.Д. Природа информации. Философский очерк. 2-е издание. Челябинск. Челябинская государственная академия культуры и искусств. 2010. 231 с.

11. Фомин Ю.М. Верхняя астеносфера – переходая зона между веществом мантии и литосферы: <http://macroevolution.narod.ru> декабрь 2009.

12. Ashby W.R. An introduction to Cybernetics / W.R. Ashby. – Chapman & Hall Ltd., 1956.

13. Bauer W. F. Informatics. An Early Software Company. / W. F. Bauer // IEEE Annuals of the history of company. – 1966. – Vol 18. N 2. – Pp. 70-76.

14. Borko H. Information Science: What is it? / H. Borko. – American documentation. – January 1968. – Pp. 3-5.

15. Brilluen L. Science and Information Theory / L. Brilluen. – Colombia university, 1956.

16. Dreyfus F. Societe d`Informatique Appliquee (SIA): <http:fr.wikipedia.org/wiki/informatique> январь 2011

17. Dehmer M., Barbarini N., Varmusa K., Graber A. (2010) A large scale analysis of information-theoretic network complexity measures using chemical structure <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/. 23.12.2010.

18. Germain J.E. Catalytic conversion of hydrocarbons. / J.E. Germain. –: Academic Press. Elsevier Science & Technology Books. –1969. – 312 p.

19. Hartley R.V.L. Transmission of Information / R.V.L. Hartley // Bell System Technical journal. –1928. – N 7. – Pp. 535-63.

20. Heisenberg W. Quantum Theory of Fields and Elementary Prticles / W. Heisenberg // Reviews of Modern Physics. – 1957. – Vol 29, N 3. – Pp. 269-278.

21. Rashevsky N. Life, Information. Theory and Topology // The Bulletin of Mathematical Biophisics. – 1955. – Vol 17. N3. – Pp. 229-235.

22. Trucco E. A note on the Information Content of Graphs / E. Trucco // The Bulletin of Mathematical Biophisics. – 1956. – Vol 18. N2. – Pp. 129-135.

23. Shannon C.E. A mathematical Theory of Communication / C.E. Shannon // Bell System Technical Journal, – 1948. – Vol 27, – Pp. 379-423, 623-56.

24. Steinbuch K. Informatik / K. Steinbuch; Automatische Informationsverarbeitung, SEG – Nachrichten (Technische Mitteilunger der Standard Elektrik Gruppe). 1957.

36. Zeilinger A. A Foundational Principle for Quantum Mechanics"/ A. Zeilinger. // Foundations of Physics. – 1999. – 29 (4). – pp. 631-43.

УДК 004.
К.К. Колин, д-р техн. наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, президент международного общества
по изучению информации
Институт проблем информатики РАН, г. Москва, Россия,
kolinkk@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ – АКТУАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА

1. Актуальность проблемы

В последние годы информация становится стратегическим ресурсом и ключевым фактором развития цивилизации. В условиях формирования глобального информационного общества эффективность использования информации в значительной степени определяет развитие экономики, науки, образования и культуры, конкурентоспособность той или иной страны в мировом сообществе, качество жизни ее населения и национальную безопасность.

Происходящий на наших глазах лавинообразный процесс глобальной информатизации общества коренным образом изменяет привычный уклад жизни и профессиональной деятельности миллионов людей практически во всех странах мира. Эти изменения столь глубоки и значительны, а их последствия столь судьбоносны, что настоящий период развития цивилизации с полным основанием можно квалифицировать как *глобальную информационную революцию* [1].

Информационные революции в истории человечества происходили и ранее. Однако та, которая происходит в XXI-м веке, является принципиально новой, как по своему содержанию, так и по тем изменениям, которые она вызывает во всех сферах жизни общества.

Исследования показывают, что современная информационная революция характеризуется:

1. Превращением информации в важнейшую *экономическую категорию*, по причине быстрого *развития* информационной экономики, информационного рынка и бизнеса.

2. *Всеобщим характером информатизации* общества и ее проникновением во все сферы *жизни* и деятельности человека.

3. Все большим *распространением* цифровой техники и цифровых технологий далеко за пределы информационной сферы общества.

4. *Глобализацией информационной среды* мирового сообщества на основе развития сетей связи, *телевидения* и информационных компьютерных сетей.

5. Беспрецедентным усилением *интеллектуальных и творческих возможностей человека за счет* использования средств информатики и когнитивных информационных технологий.

6. Формированием *информационного миропонимания и мировоззрения*, которые существенным образом изменяют традиционную вещественно-энергетическую Картину Мира, научную парадигму и методологию научных исследований.

7. Возникновением нового комплекса проблем *информационной безопасности,* о которых человечество ранее не имело ни малейшего представления.

Хотелось бы подчеркнуть, что все перечисленные особенности и проблемы современного этапа развития цивилизации, обусловленные ее глобальной информатизацией, являются принципиально новыми. Они возникли буквально в последние два десятилетия и не имеют аналогов в историческом прошлом человечества. Поэтому эти проблемы еще не нашли отражения в массовом сознании, которое существенным образом отстает от темпов развития цивилизации. А эти темпы высоки, как никогда ранее, и продолжают возрастать.

В связи с этим объективно возрастает интерес к проблемам развития науки об информации, к уточнению ее места в системе наук, к ее фундаментальным основам, а также к историко-философским, научно-методологическим и социально-культурологическим аспектам

[2].

К сожалению, в современной системе образования в отношении к изучению проблем информации все еще доминирует инструментально-технологический подход, а фундаментальные аспекты этих проблем в большинстве случаев рассматриваются в качестве второстепенных. А ведь именно они являются наиболее актуальными, так как крайне необходимы для обеспечения качественной подготовки не только научных кадров, но и специалистов самого различного профиля, а также для формирования новой информационной культуры общества.

Нам представляется, что причина такого отношения в том, что стратегическая важность изучения фундаментальных проблем информации в системе образования еще недостаточно осознана международным научно-образовательным сообществом, хотя актуальность такого изучения не вызывает сомнений.

Цель данной работы состоит в том, чтобы показать современное состояние и некоторые пути решения этой глобальной и стратегически важной проблемы.

2. Структура и содержание проблемы овладения информацией

Известный российский ученый академик Н.Н. Моисеев в одной из своих последних работ писал, что на стадии формирования информационной цивилизации человечеству предстоит решить две стратегические проблемы. Первую из них он назвал *проблемой овладения информацией*, а вторую – *проблемой обеспечения доступности информации* для всех членов общества. История свидетельствует, что этот прогноз оказался правильным. Именно эти две проблемы и являются сегодня принципиально важными и имеющими стратегический статус для развития цивилизации.

В настоящее время усилия мирового сообщества сосредоточены на решении второй проблемы, которая уже осознана и включена в качестве приоритетной во многие национальные и международные проекты и программы. Характерным примером может служить Программа ЮНЕСКО «Информация для всех», которая существует уже второе десятилетие. Для координации действий по реализации этой программы в ряде стран, в том числе и в России, созданы национальные комитеты, которые функционируют достаточно успешно. Так, например, Российский Комитет Программы ЮНЕСКО «Информация для всех», который в 2011 г. отметил свое 10-летие, признан одним из наиболее эффективных.

Хуже обстоит дело с решением другой проблемы – *овладения информацией*, так как ее стратегическая важность для развития общества только начинает осознаваться. Сегодня эта проблема еще не находится в фокусе национальной и международной научно-технической политики, а является лишь областью инициативной активности отдельных ученых, а также некоторых государственных и общественных научных организаций.

Какой же смысл сегодня вкладывается в содержание проблемы овладения информацией, и как формируется структура предметной области этой проблемы? Следует понимать, что эта проблема является комплексной, а при ее решении необходимо обеспечить:

1. философское осмысление природы информации как объективной реальности окружающего мира во всем его многообразии;

2. выявление фундаментальных законов и закономерностей проявления феномена информации в живой и неживой природе, а также в сознании человека и обществе;

3. изучение роли информации в процессах развития природы, человека и общества, включая процессы глобальной эволюции;

4. использование полученных знаний при решении практических задач в интересах обеспечения дальнейшего безопасного и устойчивого развития цивилизации, а также науки, образования и культуры, личности человека.

Ниже кратко рассматриваются современное состояние дел по решению этих задач и определяются некоторые направления их решения.

3. Значение науки об информации для инновационного развития современного общества

В декабре 2011 г. Правительством России утверждена «Стратегия инновационного развития Российской Федерации до 2020 года». В аналитической части этого *документа* указано, что мировыми тенденциями технологического развития в этот период будут следующие:

- формирование глобальных *информационных* сетей;
- формирование ядра информационных технологий на основе микроэлектроники в условиях *развития* рынка нанотехнологий;
- развитие биотехнологий в *сельском* хозяйстве, медицине и биоинформатике;
- уменьшение техногенного воздействия на *биосферу* за счет радикальных изменений в средствах и методах природоохранной деятельности.

В Стратегии также указано, что отличительной особенностью технологического развития России на ближайшие 15 лет должны стать «технологические прорывы» и создание задела для получения принципиально новых материалов и технологий. При этом особое внимание будет уделено так называемым *конвергентным технологиям*, в числе которых приоритетными являются *нанобиотехнологии* и технологии, создаваемые на основе достижений *биоинформатики*.

Так, например, предполагается, что на основе нанобиотехнологий будут созданы новые наноматериалы, наноустройства и искусственные биологические объекты, которые получат широкое применение в самых различных сферах жизнедеятельности общества. Характерным примером здесь могут служить гибкие биологические экраны для отображения информации, которые идут на смену современным жидкокристаллическим экранам. Ожидается, что массовое использование таких экранов даст не только существенную экономию в энергопотреблении, но и приведет к революционным изменениям в педагогических технологиях, информационном обеспечении массовых мероприятий, рекламном деле и в дизайнерском оформлении и освещении деловых и жилых помещений, улиц и площадей.

Специалисты прогнозируют, что в результате развития биоинформатики в ближайшие годы будет создано новое поколение компьютеров и сетей обработки информации на биологических принципах. Эти принципы начинают использоваться уже сегодня. Так, на состоявшемся в 2012 году заседании совместного Научно-технического совета РАН и ОАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» обсуждался вопрос о создании в России интеллектуальной энергетической системы, в основе управления которой модель искусственной нейронной сети. Участниками этого обсуждения стали более 80 представителей ведущих энергетических компаний России, научно-исследовательских и образовательных учреждений.

Важным направлением технологической модернизации России является усиление проникновения высоких технологий в существующие низко технологичные секторы производства, что может дать быструю и существенную отдачу в энергосбережении, в повышении эффективности производства, а также в области безопасности сложных технологических объектов и систем.

Таким образом, информационные аспекты инновационного развития играют важную, и даже ключевую, роль в решении стратегических задач системной модернизации России [3].

При этом в процессах развития многих сфер жизнедеятельности общества – экономики, промышленности, образования, науки, культуры и социальной сферы информационные технологии выполняют функции мощного катализатора. На эту особенность информационных технологий автор данной работы указывал еще в середине 90-х годов. [4]. Сегодня она проявляет себя все более интенсивно.

4. Наука об информации и современная методология научных исследований

В последние годы интерес к использованию методов науки об информации в самых различных областях научных исследований и практических разработок быстро возрастает. Его проявляют не только отдельные ученые и научные организации, но также и некоторые правительственные структуры. Так, например, еще в 2005 г. Консультативный комитет по информационным технологиям при Президенте США представил Аналитический доклад по этой проблеме. Его краткий анализ содержится в нашей работе [5].

В Докладе показано, что для предотвращения развития негативных тенденций в науке и системе образования, руководству США необходимо принять самые решительные меры. Особое внимание должно быть уделено развитию и использованию методов *информационного моделирования*, которые быстро развиваются и уже оформились в одно из перспективных направлений сферы исследований, получившей в западных странах название *Computational science* (Вычислительная наука).

Авторы Доклада утверждают, что в XXI-м веке это направление станет критическим фактором для дальнейшего развития науки, образования и высоких технологий. Они считают, что прогресс именно в этой области должен обеспечить первенство США в мировой экономике и их стратегическое превосходство в сфере высоких технологий. В Докладе показано, что развитие *Computational science* создает принципиально новые возможности для проведения научных исследований, так как с использованием средств и методов информатики ученые могут изучать самые разнообразные проблемы, исследование которых другими методами неэффективно, а зачастую и просто невозможно.

Стратегически важная особенность науки об информации состоит в том, что ее методы востребованы практически во всех предметных областях науки и могут использоваться во многих прикладных сферах научного знания, привнося в них новые качества.

Таким образом, фундаментальная наука об информации объективно становится той междисциплинарной областью, которая может многократно повысить эффективность исследований практически во всех направлениях фундаментальной и прикладной науки. Однако эта универсальность представляет не только достоинство, но и уязвимое место самой науки об информации. Ведь другие научные дисциплины, используя ее средства и методы информатики, не ставят перед собой задачи их дальнейшего развития. Поэтому и необходимы специальные меры для развития комплекса наук об информации как стратегически важного междисциплинарного научного направления.

Именно эту задачу поставило перед собой новое Международное общество по изучению информации (International Society for Information Studies – ISIS), созданное в 2011 году в Австрии. В его состав вошли ведущие специалисты из 20-ти стран мира.

5. Структура предметной области информатики

Подход российских ученых к проблемам изучения информации всегда отличался комплексностью. Ведь именно в России еще в конце 60-х годов впервые были сформированы научно обоснованные представления об информации как о всеобщем свойстве материи, имеющем принципиально важное философское, научно-методологическое и мировоззренческое значение. Решающую роль здесь сыграли работы академиков А.Д. Урсула [6] и А.П. Ершова [7], которые стали основой для формирования предметной области информатики как фундаментальной науки и комплексной научной проблемы [8].

Именно Россия на 2-м Международном конгрессе ЮНЕСКО «Образование и информатика» (Москва, 1996г.) предложила новую концепцию изучения проблем информатики как фундаментальной науки и общеобразовательной дисциплины в системе опережающего образования. При этом была предложена новая структура образовательной области *«Информатика»* и показано, что переход к этой структуре может стать важным шагом на пути интеграции фундаментальной науки и образования [9].

В России успешно, начиная с 1990 года, осуществляется развитие *социальной информатики,* как перспективного направления в науке и образовании, которое стало научной базой для формирования глобального информационного общества [10]. Сегодня развитие этого направления активно поддерживают и китайские ученые, которые принимают активное участие в деятельности упомянутого выше Международного общества.

В последние годы в Российской академии наук разрабатываются такие *философские и научно-методологические основы* комплекса наук об *информации, которые* формируют новые подходы к этой предметной области с учетом современных тенденций развития науки, образования и культуры. Некоторые из этих подходов были рассмотрены в специальном выпуске трудов Института проблем информатики РАН, посвященном современным научно-методологическим проблемам информатики [11].

Разделяя идею американских специалистов о необходимости интеграции предметной области комплекса наук об информации, как в сфере научных исследований, так и в образовании, мы, тем не менее, считаем, что для собирательного названия этой области вполне подходит уже существующий термин «*Информатика*», причем в его расширительной российской и европейской трактовке.

Ведь этим термином сегодня в России обозначается и компьютерная наука (техническая информатика), и информационная наука, и вся область, связанная с использованием информационной техники и технологий для социальных коммуникаций, проведения научных исследований, развития образования, экономики и культуры, а также вся информационная сфера деятельности, включая отрасль промышленного производства средств информатики. Обоснование конструктивности этого подхода было проведено в работе [10].

Отметим, что еще 25 лет назад академик А.П. Ершов рассматривал информатику как формирующуюся новую *фундаментальную науку,* которая будет иметь первостепенное значение не только для всего естествознания, но также и для гуманитарных наук. Этот прогноз был основан на признании фундаментальности понятия информации, которая является важнейшим объектом изучения для информатики как фундаментальной науки. Такой прогноз основывался также на гипотезе, согласно которой информационные закономерности должны иметь общую базу для своего проявления, как в живой, так и в неживой природе, в том числе и в искусственно создаваемых человеком технических устройствах и системах.

Именно эту точку зрения автор настоящей статьи последовательно отстаивает в своих работах, начиная с 1990 года.

Основные разделы предметной области информатики. Системные исследования структуры предметной области комплекса наук об информации в России начались в 1989 году. Первым результатом этих исследований стала публикация в 1990 г. статьи «О структуре научных исследований по комплексной проблеме «Информатика» [8]. В ней информатика была позиционирована как *комплексная междисциплинарная проблема* и дано определение предмета ее исследований. В этой же статье предложена структура исследований предметной области информатики в составе четырех разделов – *теоретический, технический, биологический и социальной информатики.*

Эта структура соответствует методологическому подходу Норберта Винера, который был им использован при структурировании предметной области кибернетики в начальный период формирования этой науки.

Был и еще один важный аргумент в пользу предлагаемой структуры. Он основан на фундаментальной гипотезе автора об *информационном единстве Природы.* Согласно этой гипотезе должны существовать фундаментальные законы информации, которые должны быть общими как для технических систем, так и для живой и неживой природы, включая человека и общество. Эти законы, с нашей точки зрения, и должны составлять основу информатики как фундаментальной науки.

В дальнейшем в составе предметной области информатики было создано новое направление, связанное с изучением информационных процессов в неживой природе [11]. В настоящее время это направление под названием *физической информатики* активно развивается в России [12].

Современные представления о предмете информатики. В настоящее время в мировом научном сообществе существуют три точки зрения на предмет исследований информатики. В соответствии с первой из них информатика квалифицируется как *техническая наука,* изучающая методы и средства автоматизированной обработки и передачи информации с помощью компьютеров и телекоммуникационных сетей. Эта точка зрения была доминирующей в России вплоть до 1995 года, и она определяла отношение к информатике, как в науке, так и в системе образования.

Что же касается других стран, то в США, Канаде и других англоязычных странах русскоязычному термину «*Информатика*» сегодня соответствуют, как минимум, четыре англоязычных термина и четыре области знания: *Computer Science, Information Science, Computational Science* и *Social Information science.*

При этом в области *«Computer Science»,* само название которой подчеркивает ее компьютерную ориентацию, основное внимание уделяется инструментально-техническим аспектам, а не изучению собственно информационных процессов, которыми занимается другая наука, получившая в этих странах название «*Information Science*».

В работах российских ученых достаточно подробно проанализирована эволюция представлений о предмете информатики [2, 13-14]. При этом показано ее место и перспективы развития в системе научного знания, философское и междисциплинарное значение, взаимосвязи с другими дисциплинами, в том числе, гуманитарными.

Таким образом, предметная область информатики в нашем понимании гораздо шире, чем предметная область той дисциплины, которую в странах Запада принято обозначать термином *«Computer Science»*. Иначе говоря, термин «Информатика» в России обозначает сегодня предметную область, которая включает одновременно проблематику *«Computer Science», Information Science», Computational Science* и *Social Information Science,* но не только эти науки.

Объект и предмет изучения в современной информатике. Основным *объектом изучения* для современной информатики являются *информационные процессы*, которые происходят в природе и обществе, а также закономерности, методы и средства реализации этих процессов в технических, социальных, биологических и физических системах.

Никакая другая научная дисциплина изучением данного объекта специально не занимается, хотя может исследовать отдельные аспекты информационных процессов в тех или иных информационных средах. Это достаточно убедительно подтверждают публикации, появившиеся в последние годы. Поэтому современную информатику следует квалифицировать именно как *фундаментальную научную дисциплину* [15].

Предметом изучения информатики являются свойства и закономерности информационных процессов в природе и обществе, особенности их проявления в технической, физической, биологической и социальной информационных средах. Она изучает также методы и средства их реализации и использование этих закономерностей, средств и методов в различных сферах социальной практики.

Таким образом, информатика является *комплексной междисциплинарной областью научных исследований*, которая имеет большое значение для развития цивилизации, в особенности, на этапе ее перехода к глобальному информационному обществу, основанному на знаниях.

6. Современное состояние информатики как науки

Социальная информатика. Выделение социальной информатики в качестве самостоятельного научного направления, а не только прикладной области, было сделано еще в начале 90-х годов [16], что позволило системно и целенаправленно вести исследования по данному направлению. По результатам этих работ Россия занимает ведущее место в мире в части создания теоретических основ социальной информатики, структуризации ее предметной области и формирования системы основных научных понятий [10].

Впервые это направление было представлено международному сообществу в 1996 г. на 2-м Международном конгрессе ЮНЕСКО «Образование и информатика». Этот конгресс стал крупным событием в развитии не только образования, но и самой информатики [9]].

Биологическая информатика. Не менее важным шагом явилось и выделение в качестве самостоятельного направления *биологической информатики,* как новой научной дисциплины, предметом исследования которой являются информационные процессы в биологических системах, живых организмах и растениях. Сегодня становится ясно, что влияние информационных процессов на развитие живой природы ранее недооценивалось.

В последние годы появились публикации об экспериментах, свидетельствующих, что здесь мы имеем дело с новыми, еще не изученными явлениями информационного взаимодействия, которые происходят в процессе развития объектов живой природы. Можно прогнозировать, что изучение этих явлений методами информатики позволит не только раскрыть новые фундаментальные закономерности реального мира, но и использовать их при создании новых средств технической информатики [2].

*Физическая информатика***.** В последнее десятилетие в России опубликован ряд статей и монографий, в которых показана актуальность и необходимость более глубокого изучения информационных процессов в неживой природе. В работах о законах информатики [12] показано, что основные информационные закономерности и характеристики физических систем (элементарных частиц, атомов, молекул, звезд, черных дыр) являются принципиально важными для познания не только свойств этих объектов, но и общих законов Природы.

Мы приходим к пониманию того, что использование информационного подхода позволяет получить новые, порой более общие результаты, по отношению к знаниям, получаемым на основе только физических законов. Поэтому законы информатики, совместно с физическими законами, могут служить эффективным инструментом познания Вселенной. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования теоретико-информационных методов в науках о неживой природе, в том числе - в новой научной дисциплине – *физической информатике.*

Наглядным примером практического использования законов информатики в геолого-минералогических науках может служить обоснование неорганической природы нефти и углеводородного газа, которое содержится в монографии о глубинном генезисе нефти и газа [17]. В ней показано, что нефть - это сложная система, познаваемая на основе общих законов точных и естественных наук и законов информатики.

7. Перспективные направления развития информатики

Комплексный характер проблематики наук об информации. Необходимость комплексного изучения проблематики информатики не только в рамках академической науки, но также и в системе образования, подробно рассмотрена в работах [2, 18].

Вывод, который можно сделать из анализа этих работ, заключается в том, что *наступает новый период* развития *информатики как междисциплинарного научного направления*, которое будет выполнять интеграционные функции для других направлений, как естественнонаучных, так и гуманитарных. Проникновение идей и методов информатики в эти области диктуется сегодня потребностями и логикой развития самой фундаментальной науки, а также необходимостью решения ряда прикладных проблем. Это проникновение не только даст новый импульс для развития междисциплинарных исследований, но также обогатит и саму информатику новыми идеями.

Указанная выше тенденция стала заметно проявлять себя в последние годы. В научной печати опубликован ряд статей и монографий, содержание которых свидетельствует о том, что идеи и методы фундаментальной информатики находят все большее распространение в теории систем, синергетике, физике, квантовой механике, теоретической биологии, физиологии, генетике, социологии и других дисциплинах.

Многообразие научных подходов к определению предмета и задач информатики, является вполне закономерным. В значительной степени это обусловлено многообразием современных представлений об *информации*, которое является фундаментальным понятием современной науки, но до сих пор еще не имеет однозначного определения.

Причина этого заключается в том, что феномен информации по-разному проявляет себя в различных *информационных средах*, в тех конкретных условиях, в которых протекают информационные процессы, закономерности и методы реализации которых изучает информатика. Поэтому в различных направлениях развития информатики (техническом, биологическом, социальном, физическом) анализируются лишь вполне определенные аспекты проявления феномена информации и информационных процессов, которые обусловлены иным видом конкретной информационной среды [2, 15].

Таким образом, фундаментальность понятия информации и ключевая роль информационных процессов в развитии живой и неживой природы являются теми основными факторами, которые выдвигают информатику на уровень фундаментальных наук и ставят ее в один ряд с такими науками, как общая теория систем, синергетика, кибернетика, физика, химия, биология.

Научная методология информатики. Информатика уже сегодня имеет свои собственные методы научного исследования, самыми распространенными из которых являются *метод информационного моделирования* и *информационный подход* [19]. Эти методы широко используются не только в самой информатике, но также и в других областях науки, и они уже давно стали междисциплинарными. Развитие этих методов является одной из актуальных методологических проблем.

Менее известен, но является весьма перспективным, такой сравнительно новый раздел информатики, который изучает *виртуальную реальность*. Компьютерные системы виртуальной реальности уже достаточно широко используются на практике для подготовки летчиков, космонавтов, водителей транспорта. Однако некоторые разновидности этих систем, так называемые системы глубокой виртуальной реальности, могут стать средствами для получения новых знаний. Есть основания полагать, что использование этих средств позволит получать принципиально новые знания о природе и свойствах человеческой психики, а также о процессах мышления и сознания человека, и существенно продвинуться в решении фундаментальных проблем, над которыми наука работает многие годы.

Использование методов информатики позволяет не только получать принципиально новые знания о природе, человеке и обществе, но также сформировать современную Картину Мира, новое научное мировоззрение, а также новую информационную культуру человека и общества [20].

Междисциплинарное взаимодействие. Можно ожидать, что в ближайшие десятилетия комплекс наук об информации будет активно развиваться во взаимодействии с другими дисциплинами, и в дальнейшем информатика будет квалифицироваться как *самостоятельная отрасль науки*, имеющая такое же значение, как физика, химия, биология, психология и другие.

При этом необходимо подчеркнуть, что эта область сочетает в себе как естественнонаучные, так и гуманитарные аспекты. Поэтому именно в области междисциплинарных исследований на стыках наук об информации с другими науками и следует в ближайшие годы ожидать получения принципиально новых результатов.

Философия информации. Развитие исследований философских основ наук об информации осуществляется по двум основным направлениям. Одно из них состоит в формировании *философии информации,* как одного из самостоятельных направлений развития философии. Это направление развивается в России, Китае, Великобритании и США. Основоположником этого направления является доктор философских наук, профессор Аркадий Дмитриевич Урсул [6].

Второе направление заключается в изучении *философских проблем информатики*, ее роли в развитии других наук и формировании нового научного мировоззрения [2].

Можно предположить, что в дальнейшем произойдет интеграция этих направлений и на их основе возникнет *метаинформатика*. Эта новая научная дисциплина, возможно, объединит самые наиболее общие концептуальные результаты и концепции этих двух направлений и станет основой формирования новой парадигмы, основанной на интеграции естественного и гуманитарного направлений в науке для получения более глубоких знаний о природе, человеке и обществе.

Перспективы развития технической информатики. В ближайшие годы здесь следует ожидать прорывных результатов на основе *интеграции информационных, биологических и нанотехнологий*. Будет происходить дальнейшая микроминиатюризация технических средств информатики массового применения, что радикально изменит наш образ жизни за счет развития персональных средств ИКТ, создания новых интеллектуальных устройств и предметов быта и профессиональной деятельности, сделает его более комфортным. При этом новый импульс развития должна получить *мехатроника* - новая техническая наука, изучающая методы создания и функционирования автономных сверх-миниатюрных устройств и роботов.

Качественно новые и социально значимые результаты следует ожидать и от развития промышленного производства *гибких биологических экранов*. Их применение в сфере образования позволит использовать новые педагогические технологии, ориентированные на активную работу правого полушария головного мозга человека, ответственного за пространственное воображение и образное мышление.

Развитие социальной информатики. В этой области в последние годы в нашей стране разворачиваются исследования проблем *информационной культурологии, информационной антропологии,* а также создания *информационной концепции искусства и творчества* [21, 22].

Авторами первой монографии по информационной культурологи являются российские ученые. В этой работе проведен системный анализ состояния, задач и перспектив развития информационной культурологии, ее философских основ и взаимосвязей с проблемами развития информационного общества. Предложены определения понятий информационной и электронной культуры, рассмотрена структура и содержание предметной области информационной культурологи, а также основные направления ее развития.

В монографии показано, что информационная культурология – это новая наука, изучающая феномен культуры и развитие информационной культуры общества на основе информационного подхода. Сегодня эта наука находится в начальной стадии своего формирования. Однако изучаемые ею проблемы в условиях становления глобального информационного общества являются исключительно важными и актуальными. Они требуют изучения, как в науке, так и в образовании. Ведь уровень развития информационной культуры сегодня определяет не только качество жизни в той или иной стране, степень ее социально-экономического развития, но и место этой страны в мировом сообществе, ее национальную безопасность.

Несколько менее продвинутыми являются разработки *теории развития информационного общества, основанного на знаниях,* теории информационных ресурсов, информационной экономики, гуманитарных проблем информационной безопасности, включая проблемы виртуализации общества и манипуляции сознанием [23-24].

Развитие биоинформатики. Биоинформатика находится на стыке физико-математических, биологических, медицинских и сельскохозяйственных наук. Она охватывает широкий круг сложных и актуальных проблем и поэтому справедливо рассматривается как одно из важнейших направлений развития науки в XXI веке.

В настоящей работе хотелось бы подчеркнуть лишь научно-методологические и философские аспекты развития этого направления, его тесную связь с научной методологией и философскими принципами информатики, а также его значение для формирования современного научного мировоззрения на основе понимания важнейшего философского принципа *информационного единства Природы*.

Некоторые перспективы развития этого направление более подробно рассмотрены в работах [2].

Развитие физической информатики. В данной области следует ожидать принципиально новых и важных результатов. Одним из них будет формирование *квантовой информатики* – новой научной дисциплины, изучающей закономерности информационных процессов на квантовом уровне.

Философское значение этой дисциплины трудно переоценить, поскольку появление такого принципиально нового направления развития науки означает, что человек приступил к овладению информацией на качественно новом уровне самоорганизации материи, а именно – на квантовом уровне, который является первоосновой для других уровней существования систем естественной и искусственной природы.

Этот результат должен квалифицироваться не только как новый прорыв в развитии научно-технического прогресса, но также и как начало перехода цивилизации на качественно новый уровень развития [2, 12, 25].

8. Информатика в системе образования.

Практически во всех современных энциклопедических словарях информатика определяется как комплексное междисциплинарное научное направление. Она оказывает большое влияние на многие области научных исследований, передавая им свою методологию, главными достижения которой сегодня следует считать методологию информационного моделирования, а также информационный подход к анализу объектов, процессов и явлений в природе и обществе.

Для формирования современного научного мировоззрения изучение информатики в системе образования имеет исключительно большое значение.

Такой подход к изучению информатики, хотя и продекларирован в некоторых документах ЮНЕСКО [9], в трудах Российской академии наук, а также в проектах новых государственных образовательных стандартов России, практически еще очень медленно внедряется в систему образования. Причина этого заключается не только в отсутствии хороших учебников по информатике для высшей и средней школы, но, главным образом, в консервативности мышления чиновников, работающих в сфере образования. Ведь они и сегодня продолжают считать информатику технической дисциплиной, которая изучает, главным образом, компьютеры, информационные технологии и телекоммуникационные системы.

В то же время в России и других странах публикуется значительное количество научных работ, в которых отмечается, что осмысление определяющей роли информации в эволюционных процессах природы и общества формирует совершенно новую, информационную Картину Мира. Она существенным образом отличается от традиционной вещественно-энергетической Картины мироздания, которая доминировала в науке еще со времен Декарта и Ньютона практически до конца XX века.

Можно ожидать, что формирование этой новой Картины Мира будет осуществлено в науке в ближайшие десятилетия. Она должна стать основой *новой научной парадигмы*, в которой информационным аспектам науки и практики будет отведена существенно более важная роль по сравнению с тем, как это имеет место в настоящее время.

Эта парадигма должна привести и к формированию новой концепции основания самой информатики, философские основы которой, конечно же, должны изучаться и в системе образования, и в системе подготовки научных кадров.

9. Состояние и перспективы развития международного сотрудничества в области изучения информации

В последние годы в России, Китае, США и странах Западной Европы существенно активизировался интерес к изучению научно-методологических и философских аспектов науки об информации. Так, например, в 2010 г. в Пекине состоялась Четвертая Международная конференция по фундаментальным основам информационной науки (Fourth International Conference on the Foundations of Information Science – FIS 2010), для участия в которой в качестве Почетного Президента был приглашен и автор настоящей работы. Конференция была организована Международным Координационным Советом по фундаментальным основам информационной науки, который является общественной сетевой научной организацией, в состав которой входят 62 представителя из 20 стран мира. При этом шестеро ученых представляют Россию.

Начиная с 1994 года, этот Совет проводит научные конференции по фундаментальным основам информационной науки в различных странах: Испании (1994), Австрии (1997), Франции (2005), Китае (2010). Очередную конференцию по данной проблеме (FIS 2013) планируется провести в мае 2013 года в России на базе Московского гуманитарного университета.

В 2010 г. в Пекине состоялось заседание Международного Координационного Совета, на котором было принято решение о создании новой общественной международной научной организации - Международного общества по изучению информации (International Society for Information Studies – ISIS). В июне 2011 г. это Общество было зарегистрировано в Австрии, а его Президентом избран представитель России. В ближайшие годы планируется создание региональных отделений ISIS в Европе, России, Китае и США.

Проблемы развития информационной науки в последнее время обсуждались и на других международных конференциях. Одна из них состоялась в 2010 г. в Азербайджане, а другая в 2011 г. - в Болгарии. Международная конференция по истории информатики (SoRuCom – 2011) состоялась в России и проходила под эгидой Международной федерации по обработке информации (IFIP) [3].

Новые научные центры по изучению информации. В университетах ряда стран мира сегодня создаются новые институты и научные центры по изучению как фундаментальных, так и социальных проблем информации. Так, например, *Институт социальной информационной науки* (Social Information Science Institute) был создан в 2006 г. в составе Хуаджонгского университета науки и технологий Китая. Директором этого Института является Вице-президент университета профессор Kang Ouyang. В 2007 г. этот Институт провел в Китае первую национальную конференцию по проблемам социальной информационной науки. В 2010 г. заместитель директора этого Института профессор Zong-Rong Li опубликовал свою монографию по этим проблемам. В ней подчеркивается преемственность проводимых в Китае исследований с работами российских ученых.

В 2010 г. в составе одного из университетов Китая (г. Сиань) создан *Международный исследовательский центр по философии информации*. Руководителями этого Центра являются китайский профессор Wu Kun и специалист по междисциплинарным исследованиям из Франции профессор Joseph E. Brenner. Членами Международного Академического совета этого Центра избраны российские ученые К.К. Колин и А.Д. Урсул, известный специалист по изучению проблем философии информации Luciano Floridi (Великобритания), а также вице-президенты ISIS Wolfgang Hofkirchner (Австрия) и Pedro C. Marijuan (Испания).

В ближайшие годы Центр планирует подготовку и издание серии научных монографий в области философии информации на китайском и английском языках. Одна из них, изданная в 2010 г. в России [4], уже переведена на китайский язык и издана в 2012 году в Пекине. Сейчас завершается ее перевод на английский язык.

Новые российские научно-образовательные центры. По инициативе Российской академии наук в нашей стране также создаются новые научно-образовательные центры (НОЦ) по изучению проблем информации, новых информационных технологий и развития информационного общества. Один из них - НОЦ «*Информатика, информационные технологии и управление*» – создан в 2009 г. в Красноярске в составе Сибирского федерального университета, а другой НОЦ «Информационное общество» – в 2011 г. был создан в составе Челябинской государственной академии культуры и искусств [32].

Задачей этих Центров является внедрение результатов исследований фундаментальных основ наук об информации в систему высшего образования, разработка новых учебных курсов для магистров и аспирантов, а также подготовка предложений по модернизации Государственных образовательных стандартов России.

Совместным решением, принятым руководством Института проблем информатики РАН и Института научной информации по общественным наукам РАН, в 2011 г. создан и успешно функционирует Научно-методологический семинар по философским проблемам наук об информации.

Казалось бы, положительные тенденции налицо. Однако следует признать, что, как в России, так и в других странах, сегодня все еще отсутствует четкое позиционирование науки об информации в системе научного познания, а научно обоснованные подходы к изучению ее проблем в системе образования и подготовки научных кадров должным образом не используются. Это и является существенным препятствием на пути решения проблемы овладения информацией как наиболее важным стратегическим ресурсом развития цивилизации.

Заключение

В последние годы мир стремительно изменяется. Он становится все более тесно взаимосвязанным, динамичным, непредсказуемым и опасным. Быстро истощаются запасы жизненно важных природных ресурсов, что обостряет борьбу за право владения их источниками. Все более заметно проявляются изменения климата, обусловленные техногенной деятельностью людей, численность которых уже превысила 7 млрд. В мире ощущается нехватка питьевой воды. Все это требует приложения усилий мирового сообщества для обеспечения скорейшего перехода цивилизации к новому технологическому укладу, основанному на знаниях и высокоэффективных технологиях.

Особенно быстрые и радикальные изменения происходят сегодня в информационной сфере. Новые средства информатики и информационные технологии становятся атрибутами массовой культуры, они радикально изменяют наши привычки и ценности, а также традиционные представления о качестве жизни.

Мировые и национальные информационные ресурсы становятся все более доступными через глобальные информационно-телекоммуникационные сети. Их объемы стремительно увеличиваются. Это единственный глобальный ресурс цивилизации, который с течением времени не истощается, а только растет. Однако для его эффективного использования нужны новые знания и новая информационная культура общества, новое миропонимание и новое мировоззрение.

Все это может дать обществу наука об информации, которая в последние годы получила новые и довольно мощные основания для своего развития. Существенный вклад в ее развитие вносят российские ученые, которые расширяют свое сотрудничество с зарубежными специалистами. Эта деятельность направлена на выявление информационных законов, которые должны обеспечить человечеству полное овладение информацией и открыть перед человеком поистине безграничные возможности для своего развития и совершенствования.

Именно поэтому изучение фундаментальных основ науки об информации является сегодня крайне необходимым не только для научных работников и преподавателей учебных заведений, но и для каждого образованного человека. Это стратегически важная задача инновационного развития общества в XXI веке.

Библиографический список использованных источников

1. Колин К.К. Информационная глобализация общества и гуманитарная революция. / К.К. Колин // Сб. н. тр. «Глобализация: синергетический подход». – М.: Изд-во РАГС, 2002. – С. 323–334.
2. Колин К.К. Философские проблемы информатики. / К.К. Колин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 264 с.
3. Колин К.К. Модернизация России и стратегические приоритеты образования. /Модернизация России: информационный, экономический, политический и социокультурный аспекты / К.К. Колин //Сб. науч. статей. – М.: Изд-во МосГУ, 2012. – С. 3-16.
4. Колин К.К. Информационные технологии - катализатор процессов развития современного общества. / К.К. Колин //Информационные технологии. – 1995, – № 10. – С. 2-8.
5. Колин К.К. Будущее информатики в 21 веке: российский ответ на американский вызов. / К.К. Колин // Открытое образование. – 2006. – № 2(55), - С. 73-77.
6. Урсул А.Д. Природа информации. Философский очерк. / А.Д. Урсул. – М.: Политиздат, 1968. - 288 с.
7. Ершов А.П. Информатика: предмет и понятие. / А.П. Ершов // В кн. Кибернетика. Становление информатики. – М.: Наука, 1986. - С. 28-31.
8. Колин К.К. О структуре научных исследований по комплексной проблеме «Информатика». / К.К. Колин Сб. н. тр. «Социальная информатика». – М.: ВКШ при ЦК ВЛКСМ, 1990. - С. 19-33.
9. Политика в сфере образования и новые информационные технологии. Национальный доклад России. 2-й Международный конгресс ЮНЕСКО «Образование и информатика» (Москва, 1996). – М.: ИИТО ЮНЕСКО, 1997.

10. Колин К.К. Социальная информатика: Учебное пособие для вузов. / К.К. Колин – М.: Академический Проект, 2003. – 432 с.

11. Колин К.К. Фундаментальные проблемы информатики. / К.К. Колин // Сб. н. тр. «Системы и средства информатики». – 1995. Вып. 7. – М.: Наука. - С. 5-20.

12. Гуревич И.М**.** Законы информатики - основа строения и познания сложных систем. / И.М.Гуревич. – М.: РИФ «Антиква», 2003. – 176 с.

13. Колин К.К. Будущее информатики в 21 веке: российский ответ на американский вызов. / К.К. Колин // Открытое образование. – 2006. – № 2(55). – С. 73-77.

14. Колин К.К. Эволюция информатики. / К.К. Колин // Информационные технологии, – 2005. – № 1. – С. 2-16.

15. Колин К.К. Становление информатики как фундаментальной науки и комплексной научной проблемы. / К.К. Колин Сб. н. тр. //Системы и средства информатики. Спец. вып. Научно-методологические проблемы информатики. – М.: ИПИ РАН, 2006. – С.7-57.

16. Урсул А.Д. Информатизация общества. Введение в социальную информатику. Учеб. пособие./ А.Д.Урсул. — М.: Акад. общ. наук, 1990. – 191 с.

17. Сейфуль-Мулюков Р.Б. Нефть и газ, глубинный генезис и его практическое значение. / Р.Б. Сейфуль-Мулюков. – М.: Изд-во ТОРУС-Пресс, 2012. – 230 с.

18. Колин К.К. О структуре и содержании образовательной области «Информатика». / К.К. Колин // Информатика и образование. – 2000. – № 10. – С. 5-10.

19. Колин К.К. Информационный подход как фундаментальный метод научного познания. / К.К. Колин // Межотраслевая информационная служба. – 1998. – № 1. – С. 3-17.

20. Колин К.К. Человек в информационном обществе: новые задачи образования, науки и культуры. / К.К. Колин // Открытое образование. – 2007. – № 5 (64). – С. 40–46.

21. Колин К.К. Информационная культурология: предмет и задачи нового научного направления. / К.К. Колин, А.Д.Урсул.– Saarbrucken, Germany. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 249 pp.

22. Колин К.К. Информационная антропология: предмет и задачи нового направления в науке и образовании. / К.К. Колин // Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств. – 2011. – № 17. – С. 17-32.

23. Колин К.К. Человек и гармония: информационная концепция теории искусства и творчества / К.К. Колин //Пространство и Время. – 2011, – № 4(6). – С. 54-63.

24. Колин К.К. Виртуализация общества. / К.К. Колин // Большая Российская Энциклопедия. – 2006. Т.5, – С. 370.

25. Гуревич И.М. Информационные характеристики физических систем. /И.М. Гуревич. – Севастополь: «Кипарис», 2010. – 260 с.

УДК 517.977.5; 681.5.03

Н.Б. Филимонов, д-р техн. наук, гл. научн. сотрудник, профессор
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
nbfilimonov@mail.ru

МИФОЛОГИЗАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕТОДОЛОГИИ УЧЕТА ФАКТОРОВ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ

Уже в конце 1980-х гг. Негойцэ (C.V. Negoita) отмечал, что «наука управления приближается к той границе, за которой существенную роль начинают играть способы учета неопределенностей». Действительно, в реальных условиях функционирования объекта достижению цели управления препятствуют различные возмущающие факторы: внешняя среда, внутренние шумы, неучтенные динамические компоненты объекта, нестабильность его технических и технологических характеристик, погрешности изготовления и монтажа исполнительных органов, неточность работы системы управления и др. Наличие возмущающих факторов, информация о которых заранее неизвестна (текущие значения неконтролируемы, а будущие непредсказуемы), принято называть условиями неопределенности.

Теория автоматического управления динамическими объектами в условиях неопределенности находится в стадии активного развития и рассматривает различные виды неконтролируемых возмущающих факторов, порождающих неопределенность в зависимости от степени информированности о них разработчика автоматической системы [1-3]. Ограничимся рассмотрением возмущающих факторов, порождающих «природную» (по терминологии Ю.Б. Гермейера и Н.Н. Моисеева) неопределенность, отражающую неполноту знаний, их недостоверность, а также нечеткость и неточность, относящихся к их содержанию. При этом будем рассматривать лишь регулярные возмущения, которые (в отличие от сингулярных) не приводят к изменению структуры модели объекта управления. Особенностью рассматриваемых возмущающих факторов является их аддитивная природа: согласно известному утверждению, каков бы ни был характер неопределенности, она всегда может быть приведена к аддитивной форме [4].

Детерминистическая и стохастическая парадигмы неопределенности

Преодолеть в задаче управления «природную» неопределенность формальными методами невозможно. Как подчеркнул К.В. Негойцэ: «Искусство разрешать, а в некоторых случаях просто «терпеть» неопределенности требует новых методов». Здесь необходим неформальный акт, связанный с привлечением тех или иных правдоподобных гипотез информированности (по терминологии Н.Н. Моисеева), т.е. гипотез об уровне наших знаний об источниках и механизмах возникновения возмущающих факторов, порождающих неопределенность.

В науке постоянно выдвигаются и разрабатываются различные конкурирующие рабочие гипотезы информированности, опираясь на которые возможно «устранить» неопределенность в решении прикладных задач. При этом, несмотря на разнообразие существующих гипотез, прочно установились *детерминистическая и индетерминистическая* (точнее - *стохастическая*, *вероятностная*) *парадигмы неопределенности*, отражающие два подхода к формализации гипотетической модели факторов ее порождающих. В основе данных подходов лежат альтернативные философские концепции, утверждающие (детерминизм) и отрицающие (индетерминизм) всеобщую закономерную связь и причинную обусловленность всех явлений [5].

В классической науке господствовал жестко детерминистический (строго однозначный) стиль научного мышления, считающий случайность второстепенным фактором. Лишь в середине прошлого столетия произошел переход к диаметрально противоположному - стохастическому (вероятностному) - стилю мышления, при котором категория случайности во многих областях естествознания, включая кибернетику, становится первостепенной. Как выразились известные кибернетики Л.А. Растригин и П.С. Граве: «Романтическая дымка надуманного регулярного мира сменяется яркими красками нашего живого и трижды случайного мира». При этом понятие вероятности становится (по словам философа науки Ю.В. Сачкова) «знамением теоретического естествознания XX века», а теория вероятностей превращается (по словам Б.В. Гнеденко) «в одно из наиболее мощных средств математического исследования многочисленных явлений природы, а также почти всех направлений общественной практики». Следует заметить, что даже «отец кибернетики» Винер (N. Wiener), поддавшись торжествующему буйству случая, предложил подходить ко всем процессам управления с единой, вероятностной меркой, утверждая, что «проблема автоматизации - это, по существу, проблема статистическая».

В результате, в настоящее время в теории управления доминирует стохастическая парадигма неопределенности, основанная на выборе вероятностных гипотез и построении соответствующих статистических моделей поведения порождающих ее факторов. Однако, на пути обоснования правомочности стохастического подхода к моделированию реальных явлений часто возникают серьезные затруднения научно-методического характера и, отчасти, просто заблуждения, вызванные неправомерным использованием методологии теории вероятностей и математической статистики. Неизбежные при этом ошибочные, а иногда просто абсурдные результаты дали повод известному шутливому высказыванию автора частотной теории вероятностей фон Мизеса (R. von Mises): «Существуют три вида лжи - просто ложь, наглая ложь и статистика». Заслуживают внимание негативные высказывания в том же тоне выдающихся математиков-прикладников современности: «Вероятность это важнейшее понятие в современной науке особенно потому, что никто совершенно не представляет, что оно означает» Рассел (B.A.W. Russell); «Статистика расцвела пышным цветом и приходится даже остерегаться ее слишком поспешных и неправомерных применений» Курно (A.A. Cournot); «Верификация гипотезы о случайности объекта, который действительно случаен, в общем случае принципиально невозможна»; А.А. Григорян; «Со статистикой что-то не в порядке» А.Н. Колмогоров; «Статистика - опасная парадоксами наука (и часто большая ложь)» В.И. Арнольд; «Математики не верят в вероятность» Л.С. Понтрягин; «Я весьма счастлив разделить точку зрения Понтрягина и заниматься математикой, не связывая себя верой (т.е. априорной гипотезой), касающейся вероятности» Калман (R.E. Kalman).

При этом следует заметить, что в настоящее время в литературе с одной стороны широко освещаются философские и научные споры о детерминизме, природе случайных явлений, онтологическом статусе вероятности и т.п., а с другой стороны остаются в тени дебаты по одному из наиболее важных вопросов современного естествознания - о правомерности применения вероятностностатистической методологии в прикладных задачах. Речь идет о полемических работах видных отечественных и зарубежных ученых: Ю.И. Алимова, В.Н. Тутубалина, Ю.А. Кравцова, Я.И. Хургина, Е.С. Вентцель, В.М. Резникова, В.И. Купцова, Н.Н. Моисеева, П.Е. Эльясберга, М.Г. Акопова, Л.А. Левина, С.Ф. Левина, А.П. Вощинина, В.П. Леонова, И.Б. Челпанова, Р.В. Яралошвили, Г.И. Ломако, А.К. Звонкина, В.А. Успенского, В.П. Ижевского, И.И. Блехмана, А.Д. Мышкиса, К.И. Валькова, В.В. Волгина, А.Л. Семенова, А.Х. Шеня, А.А. Григоряна, Леонтьева (W. Leontief), Оттестеда (P. Ottestad), Гилиса (D.A. Gillies), Литлвуда (J.E. Littlewood), Тьюки (J.W. Tukey), Смита (J.M. Smith), Белтрами (E. Bel-trami), Хемельрийка (J. Hemelrijk), Аллайса (M. Allais), Чайтина (G.J. Chaitin) и др. (см., напр., [6-27]). Примечательно активное участие в этой полемике одного из основоположников современной статистической теории автоматического управления - Р.Е. Калмана (см., напр., [28-30]).

Приведем основные положения библиографического анализа вопроса о правомерности применения вероятностно-статистической методологии в прикладных задачах, выполненного в работах автора [31, § 7.5.1; 32, п. 5; 33, 34].

Мифы и рифы вероятностно-статистических методов

В материалах полемики по методологическим особенностям прикладной математики все чаще высказывается весьма скептическое отношение к вероятностно-статистическим методам, вызванное их оторванностью от реальных прикладных задач. Как отмечает В.Н. Тутубалин, в современной аксиоматизированной теории вероятностей «сложилось ненормальное положение, связанное с переоценкой ее практических возможностей». В частности, в стороне остается вопрос, «каким явлениям действительности аксиоматическая модель соответствует хорошо, каким похуже, а каким и вовсе не соответствует», поскольку в теоретико-множественной аксиоматике Колмогорова «ничего не говорится о том, как узнать, приложима ли вероятностная модель к данному конкретному явлению».

Как известно, область применения вероятностно-статистической методологии ограничена непредсказуемыми, *массовыми явлениями, которым присуща статистическая устойчивость* (статистическая однородность, статистический ансамбль), являющаяся редким, тонким и, по мнению ведущих специалистов, практически не проверяемым феноменом. Несмотря на наличие ряда процедур проверки непараметрических гипотез о статистической устойчивости (критерий Смирнова, критерий Фишера-Питмена и др.), универсального способа решения вопроса о наличие статистического ансамбля не существует. При этом следует иметь в виду, что как само выдвижение гипотезы, так и проверка ее истинности, уже носят вероятностный характер.

«Выводы, полученные путем применения теории вероятностей в ситуации, где нет статистического ансамбля экспериментов, - подчеркивает В.Н. Тутубалин, - не обладают научной достоверностью». Тем не менее, искушение настолько велико, что аппарат теории вероятностей применяется не только в случаях сомнения в наличии статистического ансамбля, но даже и в случаях явного его отсутствия, либо вовсе в его бессмысленности. Это касается, прежде всего, случаев, когда речь идет не о повторяемой, массовой ситуации, а о единичных, «уникальных» событиях, которые часто считают (по причине глубокого научного невежества) случайными. Так, при разработке систем управления летательными аппаратами удается провести лишь небольшое число экспериментальных запусков аппарата, результаты которых не составляют сколько-нибудь значительного ансамбля, а иногда представляют собой вообще единственную реализацию. Поскольку единичный факт a priori лишен «критерия подтверждаемости», то в этих случаях домысливается (путем эмпирико-индуктивного умозаключения «как много раз подряд было, так, видимо, и будет») большой ансамбль и на его основе строятся вероятностные модели, которым приписывается научный характер. Кстати, в задачах управления статистические характеристики случайных величин, как правило, представляют собой усреднение по времени экспериментальных результатов, которые выступают не сами по себе, а в качестве «эргодических заменителей» средних по мнимым (несуществующим) ансамблям. В работах Ю.И. Алимова, В.Н. Тутубалина, П.Е. Эльясберга, И.Б. Челпанова, Р.В. Яралошвили и др. приводятся многочисленные примеры недоразумений, вызываемых домысливанием ансамбля, а также дается резкая критика ансамблевых моделей безансамблевых ситуаций, большинство из которых, по выражению В. Леонтьева, «идет на свалку без какого-либо практического применения или сразу же после поверхностной апробации».

Кстати, известный афоризм «garbage in, garbage out» («мусор на входе - мусор на выходе») в полной степени отвечает большинству случаев практического использования методов математической статистики в задачах управления в условиях неопределенности, поскольку она не дает четких предписаний как действовать в этих условиях, а, по образному выражению Ю.И. Алимова, лишь «заметает неизбежный мусор под ковер».

Жесткость условий корректного применения теории вероятностей и ограниченность статистического экспериментального материала породили нарастающий поток работ, посвященных «проблеме малых выборок» [35], т.е. восстановлению статистического ансамбля по его ограниченной выборке. Здесь для спасения концепции статистической однородности предпринимаются попытки поиска менее строгих, косвенных путей обеспечения репрезентативной (достаточно большой и представительной) выборки, которая достаточно хорошо отражает свойства всей генеральной совокупности. Однако, до сих пор ясное понимание проблемы малых выборок не достигнуто (в частности, отсутствует исчерпывающий критерий выборки) и ее решение не найдено. Вообще, касаясь выборок, следует помнить известный и весьма поучительный *софизм*: Мы говорим, что выборку образуют результаты нескольких независимых экспериментальных измерений, проводимых в одинаковых условиях. Однако, если мы контролируем все условия эксперимента, то у нас всегда будет получаться одно и то же число, т.е. не будет никакой неопределенности, а если мы не контролируем все условия эксперимента, то откуда мы можем знать, что они остаются одинаковыми.

Итак, в работах ряда авторов утверждается, что теорию вероятностей и математическую статистику нельзя считать наукой в строгом смысле этого слова, т.к. невозможно проверить на практике достоверность полученных с ее помощью результатов. В качестве примера «неверифицируемых» приводятся понятия: генеральной совокупности, доверительного интервала на неизвестное среднее случайной величины, ошибки первого и второго рода при проверке гипотез и др., которые невозможно проверить на реальных экспериментальных установках. При этом ставится под сомнение сама возможность воспроизвести статистический эксперимент в лабораторных условиях.

Неопределенность - это не случайность

«В огромном большинстве случаев, - подчеркивает В.Н. Тутубалин, - возможность статистического описания хотя бы какой-нибудь одной стороны изучаемого явления достоверно не установлена». Несмотря на это, не ослабевает популярность стохастического подхода к построению моделей неопределенности и, более того, продолжает возобладать необоснованный взгляд на вероятностно-статистическую методологию, как научную основу «принятия решений перед лицом неопределенности» [36]. В тех случаях, когда мы не можем знать что-то точно, современная наука часто предлагает нам описывать это «что-то» в терминах вероятностей.

Основное заблуждение сторонников стохастических моделей неопределенности связано с ее отождествлением (независимо от природы) со случайностью. При этом теория вероятностей рассматривается ими (по выражению В.Н. Тутубалина) «совершенно особой наукой, в которой из полного незнания можно сделать некие содержательные выводы», в то время как она (по выражению Е.С. Вентцель) - лишь «средство преобразования одной информации в другую».

На практике «нет априорных математических оснований полагать, - замечает Касти (J. Casti), - что механизм, порождающий неопределенность, по своей природе непременно стохастичен». Действительно, возмущающие факторы, по-рождающие неопределенность, как правило, не относятся к классу повторяемых и не обладают свойством статистической устойчивости. В связи с этим В.Н. Тутубалин особо подчеркивает, что «неопределенность какого-то события (в том смысле, что оно может наступить или не наступить) не есть еще случайность в смысле теории вероятностей: случайность есть статистически устойчивая неопределенность».

Однако, если даже предположить стохастичность механизма неопределенности, то для построения ее стохастической модели необходимо иметь, как выразился Р.Е. Калман, «чересчур много информации, которая не может быть извлечена из доступных данных в большой массе практических задач». Здесь же следует напомнить, что в литературе общепризнанно считать неопределенными величины, для которых статистическая устойчивость не обнаруживается, и, следовательно, аппарат теории вероятностей и математической статистики не имеет к ним никакого отношения. Это и дало основание для резких высказываний Р.Е. Калмана: «Мы должны отрицать, что классические вероятностные структуры классической теории вероятностей, на самом деле, имеют научное отношение к описанию неопределенности» и Н.Н. Моисеева: «Стохастические задачи, т.е. задачи, содержащие случайные величины или функции, мы не относим к числу задач, содержащих неопределенные факторы».

Итак, следует констатировать, что неопределенность - это не случайность и применение к ней вероятностно-статистических методов относится, по выражению В.Н. Тутубалина, «не к области науки, а к области магии».

Драматическая смена парадигмы неопределенности и гарантирующая стратегия управления

Следует констатировать, что стохастический подход далеко не универсален даже в условиях его правомерности. В ряде случаев вероятностные характеристики не могут служить эффективными показателями качества процесса управления, поскольку статистические характеристики - это результаты осреднений по большому (теоретически - бесконечно большому) числу экспериментов. В связи с этим, они принципиально не могут гарантировать определенный исход одного конкретного эксперимента, что как раз и требуется во многих прикладных задачах. Более того, использование методологии, ориентированной на синтез систем управления в «среднем», при стечении определенных обстоятельств не только не обеспечивает заданные показатели точности и качества, но и может привести к аварийным ситуациям. Так, например, при управлении посадкой самолета пилота абсолютно не волнует, каким будет среднеквадратическое отклонение самолета от оси взлетно-посадочной полосы в момент приземления, найденный по результатам какого-либо большого числа посадок. Ему необходимо, чтобы именно в данной посадке отклонение самолета не превысило заданного значения. Это касается и других случаев управления техническими объектами и технологическими процессами, когда редкие отклонения управляемых параметров сверх допустимых пределов могут привести к катастрофическим последствиям.

В последние десятилетия в ряде областей естествознания, включая кибернетику, наметилась тенденция к «драматической смене парадигм» [37]: стохастическая картина Мира сменяется его детерминистической картиной. Р.Е. Калман, не отвергая случайность в общем механизме Вселенной, выдвинул следующий тезис: «Природа устроена не в соответствии с правилами игры в кости, рулетки или карточной игры, иными словами, Природа не подчиняется правилам традиционной вероятности». Учитывая тенденцию коренного поворота к новой картине мира, все более убедительной становится рекомендация известных управленцев Б.Р. Андриевского и А.Л. Фрадкова: «Если возникает дилемма: выбрать математическую модель детерминированную или стохастическую, то предпочтение следует отдать детерминированной математической модели». Усиление роли детерминистической парадигмы неопределенности породило различного рода нестохастические модели неопределенности: концепции трехзначной логики («истина», «ложь», «не определено»), субъективную вероятность Севеджа (L.J. Savage), верхнюю и нижнюю вероятности Демпстера (A.P. Dempster), правдоподобие и доверие Шеффера (G. Shafer), емкость Шоке (G. Choquet), возможности Заде (L.A. Zadeh) и Шейкла (G.L.S. Shackle), безразличную неопределенность В.И. Иваненко и В.А. Лабковского, возможность и правдоподобие Ю.П. Пытьева, концепцию недоопределенных моделей А.С. Нариньяни, нестохастический шум А.Е. Барабанова, волновое представление неопределенностей Джонсона (C.D. Johnson), а также различные интервальные модели и модели детерминированного хаоса (см., напр. [38-41]). Особое место здесь занимают т.н. *субъективные* (аксиологические) *вероятности* [42] - неклассические вероятности, не имеющие частотный смысл, а выражающие познавательную активность исследователя случайных процессов или лица, вынужденного принимать решение в условиях дефицита информации.

Здесь уместно привести утверждение А.И. Белоусова: «… современные исследования (в частности, работы И. Пригожина) показывают, что случайность есть фундаментальная *онтологическая* категория, не сводимая ни к сложности, ни к нечеткости, ни к чему-либо, что отражает «неполноту» нашего знания, неполноту, потенциально устранимую. Такое воззрение возрождает, по существу, хотя и в модернизированном варианте, известное кредо классического детерминизма: «Наука - враг случайности».

В рамках детерминистической парадигмы неопределенности весьма популярным является *принцип гарантированного результата*. Данный принцип в наиболее общем виде впервые сформулирован Ю.Б. Гермейером [43] и получил развитие применительно к задачам управления и обработки информации в условиях неопределенности в известных монографиях: В.В. Александрова и др. [44, гл. VII], В.Н. Афанасьева [45], А.Е. Барабанова [41], В.М. Кейна [46], Н.Ф. Кириченко и др. [47], Н.Н. Красовского [48], В.М. Кунцевича и М.М. Лычака [3], А.Б. Куржанского [1], Н.Н. Моисеева [49], А.В. Небылова [50], Ю.П. Петро-ва [51], Э.Я. Рапопорта [52], А.И. Субботина и А.Г. Ченцова [53], Ф.Л. Черноусь-ко и А.А. Меликяна [54], А.Ф. Шорикова [55].

Согласно концепции гарантированного результата математическая модель неопределенности строится исходя из гипотезы «наихудшего» поведения возмущающих факторов, ее порождающих. Суть данной гипотезы состоит в интерпретации данных факторов как некоторого гипотетического неконтролируемого возмущения, характер изменения которого является неопределенным: механизм его генерации может быть произвольным, а доступная информация ограничивается лишь априорным заданием допустимой области его изменения. Это возмущение вводится в модель динамики управляемого объекта с предположением о его экстремальном (самом неблагоприятном) воздействии на процесс управления, т.е. считается, что реализуются те его значения, которым соответствует самое низке качество процесса управления. Следует заметить, что данное возмущение допускает весьма широкую трактовку и часто выступает не как физическое, а как абстрактное математическое понятие, символизирующее влияние возмущающих факторов. К нему могут быть отнесены не только собственно «внешние» возмущения, приложенные к объекту со стороны окружающей среды, но и всевозможные «внутренние» возмущения (шумы и ошибки измерения), а также неопределенные факторы, отражающие неточность математического описания объекта (неизвестные параметры, неучтенные инерционные и нелинейные звенья, погрешности линеаризации и дискретизации и т.п.). Поскольку данная модель неопределенности не позволяет однозначно предсказать реакцию объекта на управляющее воздействие, то вполне естественным является формирование стратегии управления, которая гарантирует достижение цели управления даже при самом неблагоприятном допустимом возмущении. В основе данной стратегии, именуемой *гарантирующей* или *минимаксной стратегией управления*, лежит следующая позиция «крайнего пессимизма»: принимая решение в условиях неопределенности, надо всегда рассчитывать на худшее стечение обстоятельств и принимать то решение, которое дает в этих обстоятельствах максимальный эффект.

Беллман (R.E. Bellman) предложил для преодоления трудностей, вызванных «нашим незнанием», ввести понятие «игры против природы». Принцип гарантированного результата как раз и позволяет задачу управления в условиях неопределенности интерпретировать как антагонистическую игру двух игроков - Субъекта (разработчика системы управления), определяющего стратегию управления, который персонифицируется как игрок-союзник, и Природы (внешней среды), генерирующей возмущение, которая персонифицируется как мнимый игрок-противник. Такая теоретико-игровая трактовка позволяет дать четкую математическую постановку задачи управления, как задачи оптимизации «самых плохих» из возможных процессов управления, соответствующих экстремальным возмущающим факторам, и привлечь к ее решению методы минимаксной оптимизации. Кстати, рассмотрение алгоритмов оптимизации как минимаксных стратегий в игре с природой впервые было осуществлено Кифером (J. Kiefer) еще в 1953 г.

В заключение отметим, что, пользуясь принципом гарантированного результата, мы излишне страхуемся и уподобляемся «человеку в футляре», который и в ясную погоду выходит на улицу в плаще и калошах. Гарантирующая стратегия управления, следуя известной гипотезе «враждебности неживой материи», предполагает намеренное максимальное противодействие внешней среды и является полезной для оценки верхних и нижних границ поведения управляемого объекта. Однако, излишняя ее перестраховочность в условиях, выраженных гипотезой Эйнштейна (A. Einstein): «Господь бог изощрен, но не злонамерен», может приводить к слишком завышенным значениям получаемого гарантированного результата. Именно поэтому расчеты, основанные на точке зрения «крайнего пессимизма», всегда должны корректироваться разумной долей оптимизма с известной степенью риска. И все же, в этой ситуации целесообразно руководствоваться постулатом физиков начала XX в.: «Всякое событие, имеющее отличную от нуля вероятность, обязательно произойдет». Неслучайно Н.Н. Красовский замечает, что «при проектировании ответственных конструкций расчет на наиболее неблагоприятные случаи нагрузки до последнего времени остается признанным подходом в инженерной практике».

Обсудим методологию постановки и решения ряда актуальных задач полиэдральной оптимизации процессов управления в условиях неопределенности на основе принципа гарантированного результата.

Стохастический и детерминистический подходы к задачам наблюдения

Одной из центральных проблем современной теории и практики автоматического управления является проблема наблюдения (идентификации, оценивания), связанная с восстановлением недоступных непосредственным измерениям характеристик системы на основе доступной априорной (структура и параметры системы) и апостериорной (данные измерения) информации. Математическую основу теории наблюдения составляет теория оценивания, начало которой положили пионерские работы Лежандра (A.M. Legendre) и Гаусса (C.F. Gauss) по методу наименьших квадратов (МНК), а фундамент ее современного состояния заложил Фишер (R.A. Fischer) еще в 20-30-х гг. прошлого века.

Поскольку задача наблюдения относится к числу обратных задач, то ее характерной особенностью, существенно затрудняющей решение, является *неопределенность*, обусловленная неполнотой и неточностью доступной апостериорной информации, т.е. погрешностями (помехами, ошибками) измерений, имеющими различную природу. В многочисленных работах, связанных с теорией и практикой наблюдения, для «устранения» данной неопределенности используются стохастический, либо детерминистический подходы [56].

Следует констатировать, что со дня своего зарождения *теория оценивания поглощена стохастикой* и в настоящее время располагает широким спектром статистических методов оценивания, включая следующие методы: калмановской фильтрации, марковских и байесовских оценок, максимума апостериорной вероятности и максимума правдоподобия, стохастической аппроксимации и регрессионного анализа. Все эти методы предполагают стохастическую природу шумов наблюдения с известными статистическими характеристиками (чаще - математическим ожиданием, дисперсией и коэффициентами корреляции; реже - функциями и плотностями распределения). Однако, практика показывает, что получение экспериментальным путем данных статистических характеристик затруднительно, а часто просто невозможно. Кроме того, статистические методы в общем случае используют операцию осреднения по ансамблю измерений, в то время как в реальных задачах приходится иметь дело с единственной выборкой измерений, причем весьма ограниченного объема. Здесь, как отмечают Е.Д. Теряев и Б.М. Шамриков, «устойчивость статистических характеристик не проявляется в полной мере, а решающие правила, использующие асимптотические свойства оценок, могут вводить в заблуждение». Все это явилось причиной участившейся критики стохастического подхода к задачам наблюдения. Даже такой ярый сторонник статистической трактовки задач наблюдения, как Льюнг (L. Ljung) отмечает, что «стохастическое описание возмущений не свободно от проблем» и заостряет внимание на вопросе о правомерности стохастического подхода, «поскольку мы наблюдаем конкретную последовательность данных, а подход основан на предположении, что эксперимент, порождающий этот набор данных, может быть повторен бесконечно много раз при «одинаковых» условиях».

Вопросам правомерности и корректности применения стохастического подхода к задачам оценивания посвящены работы Хубера (P.J. Huber), Р.Е. Калмана, Ю.И. Алимова, В.Н. Тутубалина, Ю.А. Кравцова, П.Е. Эльясберга, М.Л. Лидова, Б.Ц. Бахшияна, В.Н. Почукаева, А.А. Ершова, В.А. Фурсова, Г.И. Лома-ко, Б.М. Шамрикова и др. [6, 18, 20, 21, 28, 57-59].

Для использования статистического подхода к задачам наблюдения в условиях неопределенности принимается «стандартная статистическая априорная гипотеза»: любые данные измерений рассматриваются как конечная, независимая выборка из фиксированной генеральной совокупности с фиксированным вероятностным законом. При этом основными требованиями к полученным по данным выборкам статистическим оценкам, обусловливающими возможность их практического применения, являются:

- *несмещенность* (равенство математического ожидания оценки истинному значению оцениваемого параметра);
- *состоятельность* (стремление оценки к истинному значению оцениваемого параметра по мере увеличения объема выборки);
- *эффективность* (минимальность дисперсии в данном классе оценок).

Однако, часто упускается из виду тот факт, что статистические оценки могут обладать указанными свойствами лишь при достаточно жестких допущениях, принимаемых в отношении исходной апостериорной информации. В то же время, по заключению ведущего специалиста в области обработки измерительной информации П.Е. Эльясберга, «эти свойства никогда не осуществляются на практике», что, естественно, приводит к явному расхождению между выводами статистической теории оценивания и результатами ее практического применения. Даже при неизбежных малых отклонениях принятых статистических характеристик шумов измерения от их истинных значений, получаемые оценки оказываются неэффективными, смещенными, а порой и просто неустойчивыми, т.е. ухудшение точности оценивания может стать сколь угодно большим. Кстати, все эти особенности статистических методов оценивания начали выявляться сразу же при их использовании в прикладных задачах обработки информации (в частности, при определении орбит первых космических аппаратов).

Доказано, что максимальную точность обеспечивают алгоритмы оценивания, основанные на методах максимального правдоподобия, простейшим из которых является алгоритм оценивания по МНК. Несмотря на то, что его использование в задачах наблюдения статистически не обосновано, он наиболее популярен при решении прикладных задач в условиях самых общих предположений о характере шумов измерения. Теоретические исследования приписывают МНК ряд замечательных свойств и, прежде всего, состоятельность, благодаря которой точность оценивания возрастает с увеличением числа используемых измерительных экспериментов. Однако, на практике даже малые отклонения от принятых допущений нарушают все основные свойства МНК и приводят к недопу-стимым ошибкам оценивания. В связи с этим П.Е. Эльясберг подчеркивал, что широко рекламируемое свойство состоятельности МНК в практическом плане является иллюзорным, бессмысленным и составляет один из «мифов XX века», а один из основоположников современной статистической теории оценивания Р.Е. Калман утверждает, что «идея Гаусса расправиться с шумом при помощи МНК в большинстве случаев не годится, поскольку она опирается на жесткую априорную гипотезу», причем «попытка улучшить его идею путем вложения МНК в некоторые вероятностные модели вызывает еще большие возражения, поскольку при этом априорные гипотезы становятся еще суровее». Более того, П.Е. Эльясберг в своих работах последовательно отстаивал мысль о мифичности вообще всех статистических методов обработки информации, опирающихся на домысливание ансамбля там, где его нет и не ожидается.

Для иллюстрации критики стохастического подхода к задачам наблюдения приведем выдержки из высказываний Р.Е. Калмана в адрес методов идентификации систем в условиях шумов [28]: «фишеровская «выборочная модель», быть может, справедлива для некоторых статистических задач, но она совершенно не приемлема для огромного большинства исследований»; «было бы большой неправдой утверждать, что все данные являются выборкой, а вся неопределенность возникает в силу механизма статистического выбора»; «классический (колмогоровский) вероятностный подход *не может* работать в реальных задачах с недостоверными данными»; «случайность представляет собой интересное поле деятельности для изучения ее самой, но является плохим научным инструментом для работы с зашумленными данными»; «предположение (априорная гипотеза) о вероятностных структурах для описания неопределенности в задаче идентификации совершенно бесполезно, поскольку такие структуры не могут быть идентифицированы из данных». В итоге он заключает, что проблема идентификации в условиях шумов «должна быть разрешена при помощи математики, а не априорной гипотезы».

В результате, следуя общей тенденции смены парадигм неопределенности, в теории и практике автоматического управления все большее распространение получает детерминистический подход к задачам наблюдения в условиях неопределенности и, прежде всего, так называемый *детерминированный гарантирующий подход*. Здесь конкретные реализации погрешностей измерений считаются непредсказуемыми и ограниченными заданными границами возможных изменений, а решение задачи наблюдения основывается на принципе гарантированного результата, обеспечивающем нахождение оптимальных оценок для самых неблагоприятных возмущающих факторов. Получаемые оценки оказыва-ются более надежными и близкими к действительности, чем полученные на основе стохастического подхода. Кстати, целесообразность гарантирующего подхода в задачах оценивания была ясна еще в период становления теории оценивания, а толчком к его интенсивному развитию послужили задачи управления различными объектами, где резко возросли требования к точности, надежности и оперативности получения результатов оценивания.

Среди отечественных работ, развивающих детерминированный гарантирующий подход к задачам наблюдения, следует выделить работы А.Б. Куржанского, Ф.Л. Черноусько, П.Е. Эльясберга, Б.Ц. Бахшияна, Р.Р. Назирова, В.Д. Фурасова, М.И. Гусева, В.И. Ширяева, А.А. Маликова А.Ф. Шорикова, М.В. Уханова, В.М. Соловьева, И.Е. Меринова И.К. Бажинова, В.Н. Почукаева, И.Я. Каца, А.С. Кощеева и др. (см., напр., [3, 47, 55, 60-64]). Однако, несмотря на полученные значительные теоретические результаты, методы детерминированного гарантированного наблюдения из-за их высокой трудоемкости весьма редко применяются на практике. Следуя замечанию А.А. Красовского «к задачам оценивания вплотную примыкает *приближение функций*», в работах автора [31, п. 7.7; 65] предложен эффективный метод детерминированного наблюдения состояния системы в условиях неопределенности, основанный на идеологии равномерного приближения функций. Данный метод является альтернативой многочисленным методам детерминированного гарантированного наблюдения.

Библиографический список использованных источников

1. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. / А.Б. Куржанский. – М.: Наука, 1977. – 392 с.
2. Управление динамическими системами в условиях неопределенности / С.Т. Кусимов [и др.] – М.: Наука, 1998. – 452 с.
3. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич. – Киев: Наук. думка, 2006. – 264 с.
4. Multivariable Control: New Concepts and Tools / S.G. Tzafestas (Ed). Boston, 1984. – 502 p.
5. Лебедев С.А., Детерминизм и индетерминизм в развитии естествознания / С.А. Лебедев, И.К. Кудрявцев // Вестник Моск. ун-та. – 2005. – Сер. 7. Философия. – № 6. – С. 3-20.
6. Алимов Ю.И. Альтернатива методу математической статистики / Ю.И. Алимов. – М.: «Знание», 1980. – 64 с.
7. Алимов Ю.И. Является ли вероятность «нормальной» физической величиной? / Ю.И. Алимов, Ю.А. Кравцов // Успехи физ. наук. – 1992. – Т. 162. – С. 149-181.
8. Блехман И.И. Механика и прикладная математика: Логика и особенности приложений математики / И.И. Блехман, А.Д. Мышкис, Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1990. – 360 с.
9. Вальков К.И. Вероятность, информация и доводы разума / К.И. Вальков // Геометрические модели и алгоритмы. – Л.: 1986. – С. 4-25.
10. Вентцель Е.С. Методологические особенности прикладной математики на совре-

менном этапе / Е.С. Вентцель // Математики о математике: Сб. статей. – М.: Знание, 1982. – С. 37-55.

11. Волгин В.В. Модели случайных процессов для вероятностных задач синтеза АСУ. Генеральная совокупность реализаций. Эргодичность. Единственная реализация. / В.В. Волгин. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 64 с.

12. Вощинин А.П. Задачи анализа с неопределёнными данными - интервальность и/или случайность? / А.П. Вощинин // Междунар. конф. по вычислительной математике. Раб. совещ. – Новосибирск: Изд-тво ИВМиМГ СО РАН, 2004. – С. 147-158.

13. Григорян А.А. Закономерности и парадоксы развития теории вероятностей: философско-методологический анализ / А.А. Григорян. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 120 с.

14. Кравцов Ю.А. Случайность, детерминированность, предсказуемость / Ю.А. Кравцов // Успехи физ. наук. – 1989. – Т. 158. – С. 92-121.

15. Левин С.Ф. Легенда о неопределенности / С.Ф. Левин // Партнеры и конкуренты. – 2001. – № 1. – С. 13-25.

16. Налимов В.В. Язык вероятностных представлений / В.В. Налимов // Автоматика. – 1979. – №1. – С. 62-74.

17. Резников В.М. Методологические проблемы корректного применения объективистских статистических концепций / В.М. Резников // Философия науки. – 2009. – № 1 (40). – С. 118-126.

18. Тутубалин В.Н. Границы применимости: вероятностно-статистические методы и их возможности. / В.Н. Тутубалин. – М.: Знание, 1977. – 64 с.

19. Тутубалин В.Н. Теория вероятностей / В.Н. Тутубалин. – М.: Издат. центр «Академия», 2008. – 368 с.

20. Хургин Я.И. Да, нет или может быть: Рассказы о статистической теории управления и эксперимента / Я.И. Хургин. – М.: Наука, 1983. – 207 с.

21. Эльясберг П.Е. Измерительная информация: сколько ее нужно? как ее обрабатывать? / П.Е. Эльясберг. – М.: Наука, 1983. – 208 с.

22. Allais M. Fréquence, Probabilité et Hasard / M. Allais // Journ. Soc. Statist. Paris. – 1983. – V. 124, № 2. – P. 70-102.

23. Beltrami E. What is Random? / E. Beltrami. – N.Y.: Copernicus imprint of Springer-Ver-lag Publishers, 1999.

24. Chaitin G.J. Computers, Paradoxes and the Foundations of Mathematics / G.J. Chaitin // American Scientist. – 2002. – V. 90, № 2. – P. 164-171.

25. Chaitin G.J. Exploring Randomness / G.J. Chaitin. – London: Springer-Verlag, 2001. – 164 p.

26. Gillies D.A. An Objective Theory of Probability / D.A. Gillies. – London: Methuen, 1973. – 250 p.

27. Hemelrijk J. Rules for Building Statistical Models / J. Hemelrijk // Math. Centre Tracts. – 1979. – № 100. – P. 189-203.

28. Калман Р.Е. Идентификация систем с шумами / Р.Е. Калман // Успехи мат. наук. – 1985. – Т. 40, Вып. 4 (244). – С. 27-41.

29. Kalman R.E. Randomness Reexamined / R.E. Kalman // Journ. of Modeling, Identification and Control. – 1994. – V. 15. – P. 141-151.

30. Kalman R.E. Randomness and Probability / R.E. Kalman // Mathematica Japonica. – 1995. – V. 4, № 1. – P. 41-58.

31. Филимонов Н.Б. Методы полиэдрального программирования в дискретных задачах управления и наблюдения. Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5-и тт. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления. Гл. 7 / Н.Б. Филимонов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С. 647-720.

32. Филимонов Н.Б. Полиэдральное программирование в дискретных задачах управления // Информационные технологии. Приложение. – 2004. – № 1. – 32 с.

33. Филимонов Н.Б. Смена парадигм неопределенности в задачах управления. Интел-

лектуальные системы / Н.Б. Филимонов // Труды Шестого междунар. симп. – М.: РУСАКИ, 2004. – С. 173-178.

34. Филимонов Н.Б. Стохастический и детерминистский подходы в задачах параметрического оценивания. Мехатроника, автоматизация, управление / Н.Б. Филимонов // Труды Первой Всерос. науч.-техн. конф. – М.: Новые технологии, 2004. – С. 187-190.

35. Михок Г. Выборочный метод и статистическое оценивание / Г. Михок, В. Урсяну. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 248 с.

36. Бранулли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике / К.А. Бранулли. – М.: Наука, 1977. – 408 с.

37. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики / Р. Пенроуз. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 384 с.

38. Иваненко В.И. Проблема неопределенности в задачах принятия решений / В.И. Иваненко, В.А. Лабковский. – Киев: Наук. думка, 1990. – 136 с.

39. Пытьев Ю.П. Возможность. Элементы теории и применения / Ю.П. Пытьев. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 192 с.

40. Наришьяни А.С. Недоопределенные модели и операции с недоопределенными значениями / А.С. Нариньяни. - М.: ВЦ СО АН СССР. 1982. – Препр. № 400. – 64 с.

41. Барабанов А.Е. Синтез минимаксных регуляторов / А.Е. Барабанов. – СПб.: Изд-во С-Пе-терб. ун-та, 1996. – 224 с.

42. Наумов Г.Е., Подиновский В.В., Подиновский Вик.В. Субъективная вероятность: способы представления и методы получения / Г.Е. Наумов, В.В. Подиновский, Вик.В. Подиновский // Изв. АН СССР. Технич. Кибернетика. – 1991. – № 5. – С. 94-109.

43. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций / Ю.Б. Гермейер. – М.: Наука, 1971. – 384 с.

44. Оптимизация динамики управляемых систем / В.В. Александров [и др.]. Под ред. В.В. Александрова. М.: Изд-во МГУ, 2000. – 304 с.

45. Афанасьев В.Н. Концепция гарантированного управления в задачах управления неопределенными объектами / В.Н. Афанасьев // Изв. РАН: Теория и системы управления. – 2010. – №1. – С. 24-31.

46. Кейн В.М. Оптимизация систем управления по минимаксному критерию. - М.: Наука, 1985. - 248 с.

47. Бублик Б.Н. Минимаксные оценки и регуляторы в динамических системах. / Б.Н. Бублик, Н.Ф. Кириченко, А.Г. Наконечный. – Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1978. – 48 с.

48. Красовский Н.Н. Управление динамической системой. Задача о минимуме гарантированного результата / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1985. – 520 с.

49. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 488 с.

50. Небылов А.В. Гарантирование точности управления / А.В. Небылов. – М.: Наука. Физматлит, 1998. – 304 с.

51. Петров Ю.П. Вариационные методы синтеза гарантирующих управлений / Ю.П. Петров. – СПб.: СПбГУ, 1995. – 54 с.

52. Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации / Э.Я. Рапопорт. – М.: Наука, 2000. – 336 с.

53. Субботин А.И., Оптимизация гарантии в задачах управления / А.И. Субботин, А.Г. Ченцов; под ред. Н.Н. Красовского. – М.: Наука, 1981. – 288 с.

54. Черноусько Ф.Л. Игровые задачи управления и поиска / Ф.Л. Черноусько, А.А. Меликян. – М.: Наука, 1978. – 272 с.

55. Шориков А.Ф. Минимаксное оценивание и управление в дискретных динамических системах / А.Ф. Шориков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1997.

56. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователей / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

57. Алимов Ю.И. Несовместимость фишеровской теории оценок с требованием многократного воспроизведения экспериментального результата. Идентификация, прогнозирование и управление в технических системах / Ю.И. Алимов. – Владивосток: Изд-во ДальГУ, 1986. – С. 23-32.

58. Фурсов В.А. Введение в идентификацию по малому числу наблюдений / В.А. Фурсов. – М.: МАИ, 1991. – 32 с.

59. Шамриков Б.М. Определение характеристик динамических объектов по малому числу наблюдений / Б.М. Шамриков. – М.: МАИ, 1998. – 40 с.

60. Лидов М.И., Бахшиян Б.Ц., Матасов А.И. Об одном направлении в проблеме гарантирующего оценивания (обзор) / М.И. Лидов, Б.Ц. Бахшиян, А.И. Матасов // Космические исследования. – 1991. – Т. 29, № 5. – С. 659-684.

61. Куржанский А.Б. Задача идентификации – теория гарантированных оценок / А.Б. Куржанский // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 4. – С. 3-26.

62. Куркин О.М. Минимаксная обработка информации / О.М. Куркин, Ю.Б. Коробочкин, С.А. Шаталов. – М., 1990. – 214 с.

63. Фурасов В.Д. Задачи гарантированной идентификации. Дискретные системы / В.Д. Фурасов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 150 с.

64. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов / Ф.Л. Черноусько. – М.: Наука, 1988. – 320 с.

65. Филимонов Н.Б. Идентификация состояния и внешней среды дискретных динамических объектов методом полиэдрального программирования / Н.Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 2. – С. 11-15.

УДК 681.32

В.В. Кирюхин, канд. физ.-мат. наук, доцент
Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь*, Украина*
kvt.sevntu@gmail.com

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КЛАСТЕРА ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НА БАЗЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

Постановка задачи. Одним из перспективных направлений параллельной высокопроизводительной обработки данных в пакетном режиме является использование **процессорного** поля суперкомпьютеров для развертывания программируемого кластера, функционирующего под управлением единой операционной системы [1]. В отличие от обычных кластеров, здесь нет проблемы существенных задержек при передаче данных по сетевым каналам внутри кластера, и поэтому его производительность при прочих равных условиях оказывается выше, чем у его конкурента, использующего моноканалы локальной сети для межузлового обмена.

Здесь и далее под *производительностью* понимается среднее количество λ заданий пользователей, которое кластер способен выполнить в единицу времени *без его перегрузки*. Программируемый кластер может быть организован как совокупность серверов, работающих в одном из известных режимов (как правило, параллельно); серверы связываются между собой по высокоскоростным шинам коммутационного модуля суперкомпьютера. Задания, поступающие на обработку в кластер, проходят от сервера к серверу, вообще говоря, по случайным траекториям, зависящим от прикладных программ и исходных данных к ним. Различия в мощности (быстродействиях) серверов существенно влияют на продолжительность этих траекторий и в конечном счете – на его производительность.

Возникает, таким образом, проблема оптимального распределения вычислительных мощностей по серверам кластера с целью максимизации его производительности.

Целью работы является формулировка модели функционирования высокопроизводительного программируемого кластера и решение на ее базе задачи оптимального распределения мощностей по серверам кластера.

Сетевая модель кластера. Поскольку, как уже отмечалось выше, в суперкомпьютерном программируемом кластере для межузлового обмена используются шины коммутационного модуля, задержками при таком обмене можно пренебречь, и тогда вполне адекватной его моделью может служить стохастическая сеть массового обслуживания[2].

В такой сетевой модели кластер может быть описан графом с $n+1$ узлом, где узел S_0 – источник заданий, а $S_1,\ldots,S_n$ – рабочие узлы кластера. Узел S_0 представляет коллектив пользователей кластера и характеризуется суммарной интенсивностью λ_0 потока заданий от них. Рабочий узел S_i – это сервер, который характеризуется параметрами (μ_i, c_i), где μ_i – интенсивность обслуживания заданий, c_i – стоимость обслуживания одного задания в единицу времени ($i=1,2,\ldots,n$).

Связь между узлами характеризуется квадратной матрицей $P=(p_{ij})$ порядка $(n+1)$, где p_{ij} –вероятность перехода задания из S_i в S_j ,т.е. по графовой дуге (i,j), в процессе его обработки.

Предполагается, что ни одно задание, поступившее в кластер, не теряется в процессе обслуживания. Соответствующая модель называется стохастической сетью *без потерь*. Далее, в нашем случае естественно выбрать вариант *открытой* сети, поскольку величина λ_0 практически не зависит от числа заданий, пребывающих в кластере.

Режим обслуживания, при котором наблюдается равенство интенсивностей $\lambda_{вхi}$ и $\lambda_{выхi}$ входного и выходного потоков заданий для i–го узла сети, $\lambda_{вхi} = \lambda_{выхi} = \lambda_i$,$i=1,\ldots,n$, называется установившимся, или *стационарным*, режимом. В этом режиме значения λ_i вычисляются как корни системы линейных уравнений

$$\lambda_i = \sum_{j=0}^{n} p_{ji}\lambda_j, i = 0,...,n. \qquad (1)$$

Решая эту систему, можно получить выражения вида

$$\lambda_i = \alpha_i \lambda_0, i = 1,...,n, \qquad (2)$$

где α_i – коэффициент передачи, имеющий смысл среднего числа прохождений задания через узел S_i в процессе обслуживания.

Нас интересует стационарный режим функционирования кластера. Он существует, если выполняется условие

$$\lambda > \lambda_0 , \qquad (3)$$

где

$$\lambda = \min_{1\le i\le n}\{\mu_i / \alpha_i\} \qquad (4)$$

– производительность кластера в определенном выше смысле. Тогда, если имеет место неравенство (3), то кластер в стационарном режиме будет выдавать в среднем λ_0 выполненных заданий в единицу времени, и эта величина не может превышать λ.

Математическая формулировка задачи. Пусть на построение кластера (т.е. на аренду или приобретение n его серверов) выделены некоторые средства C. Пусть, далее, $\mu = (\mu_1,...,\mu_n)$ – вектор интенсивностей (быстродействий) обработки заданий серверами кластера. Требуется найти вектор μ, максимизирующий производительность (4) кластера при условии

$$\sum_{i=1}^{n} c_i\mu_i = C. \qquad (5)$$

Обозначим через $x_i = \mu_i c_i$ средства, выделенные на сервер в i–м узле; тогда

$$\mu_i = x_i / c_i, i = 1,...,n, \qquad (6)$$

и задача (4)–(5) в окончательном виде формулируется следующим образом: найти вектор $x = (x_1,...,x_n)$, максимизирующий производительность кластера

$$\lambda(x) = \min_{1\le i\le n}\left\{\frac{x_i}{\alpha_i c_i}\right\} \to \max \qquad (7)$$

при условиях

$$x_1 + ... + x_n = C, \qquad (8)$$

$$x_i \ge 0, i = 1,...,n. \qquad (9)$$

Кластер максимальной производительности. Назовем *оптимальной структурой* кластера вектор $x = (x_1,...,x_n)$, удовлетворяющий условиям (8),(9) и максимизирующий функцию (7). Решение задачи (7)–(9) базируется на следующей *теореме*:

Необходимыми и достаточными *условиями оптимальности структуры* $x = (x_1,...,x_n)$ *являются равенства*

$$x_i /(\alpha_i c_i) = const, i = 1,...,n. \qquad (10)$$

Используя эти равенства, легко находим решение. Именно, из (10) получаем

$$x_i = const(\alpha_i c_i), i = 1,...,n, \qquad (11)$$

затем, подставив эти значения в (8), имеем

$$const\sum_{i=1}^{n}\alpha_i c_i = C,$$

откуда

$$const = C / \sum_{i=1}^{n} \alpha_i c_i . \qquad (12)$$

Далее, из (7), (10) и (12) определяем максимальную производительность $\lambda_{\max}$ кластера:

$$\lambda_{\max} = C / \sum_{i=1}^{n} \alpha_i c_i ; \qquad (13)$$

наконец, используя выражения (6) и (11), получаем значения оптимальных быстродействий его серверов:

$$\mu_i = \frac{C\alpha_i}{\sum_{k=1}^{n} \alpha_k c_k}, i = 1,...,n. \qquad (14)$$

Подчеркнем, что выражения (13) и (14) определяют кластер максимальной производительности независимо от характера входящего потока заданий; требуется лишь, чтобы для сохранения стационарного режима интенсивность λ_0 этого потока была постоянной и удовлетворяла условию (3), где $\lambda = \lambda_{max}$.

Это условие можно переписать в виде $R < 1$, где

$$R = \lambda_0 / \lambda_{\max} \qquad (15)$$

– величина, которая, по аналогии с загрузкой системы массового обслуживания, может быть названа *сетевой* загрузкой, или *загрузкой кластера*.

Запишем еще одно полезное для дальнейшего рассмотрения выражение –среднего времени T полного обслуживания задания в кластере,

$$T = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \upsilon_i , \qquad (16)$$

где υ_i – среднее время обслуживания задания в *i*–м узле, *i*=1,…,*n*. Подставив сюда $\upsilon_i = 1/\mu_i$, с учетом (13) и (14) получим

$$T = n / \lambda_{\max} . \qquad (17)$$

Что касается других характеристик обслуживания заданий, то для их получения необходимо конкретизировать как вид входящего потока, так и распределения времен обслуживания заданий во всех серверах кластера. Нас интересуют по возможности явные, формульные, выражения. Для некоторых простых моделей они существуют. Приведем пример.

Экспоненциальная оптимальная сеть. Пусть моделью кластера является экспоненциальная сеть массового обслуживания, т.е. сеть с простейшим входящим потоком и с экспоненциальными временами обслуживания во всех ее узлах.

Назовем такую сеть *оптимальной,* если интенсивности обслуживания заявок в ее узлах реализованы в соответствии с формулами (14), так что она обладает максимальной производительностью (13).

Вычислим основные характеристики такой сети в стационарном режиме.

Определим время *u* реакции кластера как ожидаемое время от момента поступления задания в кластер до момента получения ответа пользователем. Это время можно оценить по известной формуле для экспоненциальной сети как

$$u = \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i}{\mu_i - \lambda_i} . \qquad (18)$$

Подставив в (18) значения μ_i из (14) с учетом (2) и (13), получим

$$u = \frac{n}{\lambda_{\max} - \lambda_0} , \qquad (19)$$

или, поделив числитель и знаменатель на $\lambda_{\max}$ и учитывая выражения (15) и (16), имеем

$$u = \frac{T}{1-R}. \qquad (20)$$

Оценим, далее, среднее полное время *w* ожидания заявки в очередях сети:

$$w = u - T.$$

Подставив сюда вместо *u* и *T* их выражения (19) и (17) соответственно, получим

$$w = \frac{TR}{1-R}. \qquad (21)$$

Анализируя последние формулы (20) и (21), приходим к заключению, что *оптимальная* экспоненциальная *сеть массового обслуживания в смысле среднего времени (20)* пребывания *заявки в сети и среднего времени (21) ожидания заявки в очередях эквивалентна простейшей системе массового обслуживания М/М/1 с* входящим *потоком интенсивностью* λ_0 *и средним временем T обслуживания заявок.*

Подчеркнем, что оптимальность сети по критерию максимальной производительности не означает ее оптимальности по другим критериям.

В качестве примера, подтверждающего этот факт, рассмотрим известный результат решения задачи оптимизации аналогичной сети по критерию *минимума времени реакции. Именно*: в задаче речь идет о выборе вектора $\mu = (\mu_1, ..., \mu_n)$ с неотрицательными компонентами μ_i, минимизирующего *время* (18) при условии (5). Не приводя здесь формулы для оптимальных значений μ_i, ограничимся рассмотрением выражения для минимального времени $u_{\min}$ реакции сети [2] :

$$u_{\min} = \frac{1}{\Delta C}\left(\sum_{i=1}^{n} \sqrt{\alpha_i c_i}\right)^2, \qquad (22)$$

где

$$\Delta C = C - \lambda_0 \sum_{i=1}^{n} \alpha_i c_i.$$

Последнее выражение с использованием соотношения (13) можно легко привести к виду

$$\Delta C = \frac{C(\lambda_{\max} - \lambda_0)}{\lambda_{\max}}.$$

После подстановки его в (22) имеем

$$u_{\min} = \frac{\lambda_{\max}}{C(\lambda_{\max} - \lambda_0)}\left(\sum_{i=1}^{n} \sqrt{\alpha_i c_i}\right)^2. \qquad (23)$$

Используя формулы (19) и (23), для отношения $u / u_{\min}$ получим:

$$u / u_{\min} = n\sum_{i=1}^{n} \alpha_i c_i \Big/ \left(\sum_{i=1}^{n} \sqrt{\alpha_i c_i}\right)^2. \qquad (24)$$

Обозначим через $a_i = \sqrt{\alpha_i c_i}$. Неравенство $n(a_1^2 + ... + a_n^2) \geq (a_1 + ... + a_n)^2$, сконструированное при этом из числителя и знаменателя дроби – правой части выражения (24), с помощью эквивалентных преобразований легко сводится к тождественному неравенству [3]

$$\sqrt{\frac{a_1^2 + ... + a_n^2}{n}} \geq \frac{a_1 + ... + a_n}{n}. \qquad (25)$$

Тогда из (24) и (25) следует, что

$$u \geq u_{\min},$$

то есть время реакции в сети с максимальной производительностью в общем случае превышает таковое для сети с минимальным временем реакции. Как следует из неравенства (25), эти времена совпадают лишь в случае, когда равны между собой все значения a_i.

Заключение. В докладе рассмотрена задача оптимального распределения вычислительных мощностей по узлам кластера, развертываемого на процессорном поле суперкомпьютера, с целью максимизации производительности кластера при ограничении на общую его стоимость.

В качестве модели производительности кластера выбрана открытая стохастическая сеть массового обслуживания без потерь, функционирующая в стационарном режиме. Задача сформулирована в терминах континуального программирования.

Специфика функции цели позволила предложить довольно простой способ решения задачи, базирующийся на теореме о фундаментальном свойстве подобных оптимальных сетей: смысл ее в том, что вычислительные мощности серверов кластера должны быть распределены по его узлам в пропорции, обеспечивающей одинаковую производительность этих узлов с учетом стоимости обработки заданий.

Получены явные выражения для максимальной производительности сети и оптимальных значений интенсивностей (мощностей) обработки заданий в узлах.

В качестве примера, в котором удалось получить формулы и для характеристик обслуживания заданий (в частности, среднего времени пребывания задания в кластере и др.), рассмотрена модель экспоненциальной сети. Получен довольно любопытный результат: оказалось, что с точки зрения основных характеристик обслуживания сеть максимальной производительности ведет себя как простейшая одноканальная система *M/M/1* со средним временем обслуживания, равным полному среднему времени обслуживания задания сетью в целом, и загрузкой, равной отношению интенсивности входящего в сеть потока к максимальной производительности сети.

В перспективе дальнейших разработок – исследования границ, в которых полученные результаты могут быть распространены на сети более общего вида, а также постановка и решение подобных задач с целочисленными переменными, представляющими количества серверов в узлах сети.

Библиографический список использованных источников

1. Кластеры, практическое руководство по параллельным вычислениями. [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://cluster.linux-ekb.info/ map.gif/netware2.php

2. Основы теории вычислительных систем / Под редакцией С.А. Майорова. – М.: ВШ, 1978. – 408 с.

3. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

УДК 530. 1
А.Л. Леонтович, канд. физ.-мат. наук, доцент,
М.П. Евстигнеев, д-р физ.-мат. наук, профессор
Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь, Украина

«СЦЕПЛЁННЫЕ СОСТОЯНИЯ» И РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ.

В настоящей работе продолжено рассмотрение применения «сцеплённых состояний» [1] к выводу формулы релятивистского закона всемирного тяготения (РЗВТ). В работе [2] было отмечено, что масса тела является скалярной величиной, не зависящей от скорости его движения относительно любой системы отсчёта (СО). Вследствие этого возможны два пути вывода РЗВТ. 1. Записать выражение для релятивистского интервала (xi , i = 1, 2, 3, 4) для движущегося тела, взять последовательно две производные по собственному времени и получить выражение для 4-вектора ускорения. Произведение массы тела на это ускорение даст выражение для 4-вектора силы. 2. Записать 4-вектор импульса в инерциальной системе отсчёта (ИСО), взять от него производную по собственному времени – вновь получим 4-ветор силы. Такие операции были проделаны в [2]. Далее выполним «сцепление», аналогичное [3], выражения для релятивистской силы с ЗВТ и получим РЗВТ.

Рассмотрим два случая движения тела в центральном гравитационном поле некоторого аттрактора (А). Пусть в первом случае импульс тела изменяется только по направлению, т.е. сила направлена перпендикулярно к импульсу ($\vec{F} \perp \vec{p}$) – импульс тела по величине не меняется. Тогда

$$\vec{F}_{\perp} = \frac{m\vec{a}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Во втором случае сила параллельна импульсу ($\vec{F} \parallel \vec{p}$). Тогда

$$\vec{F}_{\parallel} = \frac{m\vec{a}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}}.$$

Учитывая, что ускорение тела в гравитационном поле (иначе, только под действием сил тяготения) совпадает с численным значением напряженности гравитационного поля в точке мгновенного нахождения тела ($\vec{a} = \vec{g}$), можно утверждать, что $a = G\frac{M}{r^2}$, $v^2 = G\frac{M}{r}$ – в первом случае и $F_{\perp} = G\frac{Mm}{r^2\sqrt{1-\frac{GM}{c^2 r}}}$; во втором случае (при радиальном падении) $\frac{v^2}{2} = G\frac{M}{r}$.

Сила, действующая на тело будет равна (второй случай):

$$F_{\parallel} = G\frac{Mm}{r^2\left(1-\frac{2GM}{c^2 r}\right)^{\frac{3}{2}}}.$$

В физике принято обозначение $\frac{GM}{c^2} = r_g$ – гравитационный радиус. Так что обе формулы могут быть записаны в следующем виде:

$$F_{\perp} = G\frac{Mm}{r^2\sqrt{1-\frac{r_g}{r}}} \text{ и } \overrightarrow{F}_{\parallel} = G\frac{Mm}{r^2\left(1-\frac{2r_g}{r}\right)^{3/2}}$$

Здесь G – гравитационная постоянная, M – масса аттрактора, m – масса тела, r – расстояние между телом и аттрактором, c – скорость света, v – скорость тела.

Из приведенных формул видно, при сближении тела с аттрактором на расстояние приближающееся к гравитационному радиусу последнего сила их взаимодействия (притяжения) неограниченно растёт вплоть до бесконечно больших значений. Такие объекты в астрофизике называют «чёрными дырами».

Библиографический список.

1. Леонтович А.Л. К вопросу о «сцеплённых состояниях» // Материалы 6-й Междунар. научно-технич. конф. «Актуальные вопросы теоретической и прикладной биофизики, физики и химии», т.1, с.150-154. БФФХ – 2010 – изд. СевНТУ.

2. Леонтович А.Л., Евстигнеев М.П. Нетрадиционное изложение специальной теории относительности // Вісник СевНТУ. Вип. 99: Фізика і математика. Зб. наук. Пр.. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2009.-156с.

3. Леонтович О.Л., Євстигнєєв М.П. До формалізму спеціальної і загальної теорій відносності // Материалы 7-й Междунар. научно технич. конф. «Актуальные вопросы БФФХ», с. 379-382. БФФХ-2011- Изд. СевНТУ.

УДК.681.5.
Ю.Е. Обжерин, д-р техн. наук, профессор,
Е.Г. Бойко, ст. преподаватель
Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь, Украина
vmsevntu@mail.ru

ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ ФАЗОВОГО УКРУПНЕНИЯ

Несмотря на высокие технологии в современном приборостроении, остро стоит проблема выявления скрытых отказов (СО) производственных систем (ПС), которые могут быть обнаружены только во время проведения контроля.

Многообразие контролируемых параметров и контрольно-измерительных процедур приводит к необходимости создания программы контроля многокомпонентных систем, в основе которой лежит математическое моделирование. Для построения моделей контроля восстанавливаемых ПС наиболее перспективным является метод, основанный на применении полумарковских процессов (ПМП) с общим фазовым пространством состояний. Главная трудность, возникающая при этом, состоит в размерности моделей. На помощь решения данной проблемы приходит применение алгоритмов фазового укрупнения (АФУ). Это метод упрощенного анализа стохастических систем, в основе которого лежат предельные теоремы, что позволяет применять его в виде алгоритмических правил, доступных системному анализу. АФУ применим к классу стохастических систем, эволюция которых описывается ПМП [1]. В настоящей статье этот метод применяется для нахождения стационарных и экономических характеристик функционирования двухкомпонентной ПС.

Целью статьи является определение стационарных характеристик функционирования двухкомпонентной ПС с учетом контроля скрытых отказов.

Опишем функционирование системы с отключением последовательно соединенных работающих компонентов на время проведения контроля, временная диаграмма функционирования которой приведена на рисунке 1. Система состоит из двух компонентов К1 и К2. Время безотказной работы компонентов – случайные величины (СВ) α_1 и α_2 с функциями распределения (ФР) $F_1(t)=P\{\alpha_1 \le t\}$ и $F_2(t)=P\{\alpha_2 \le t\}$ и плотностью распределения (ПР) $f_1(t), f_2(t)$ соответственно. Контроль проводится через случайное время δ с ФР $R(t)=P\{\delta \le t\}$ и ПР $r(t)$. На время проведения контроля работоспособный компонент отключается. Отказ обнаруживается только во время проведения контроля. Длительность проведения контроля СВ γ с ФР $V(t)=P\{\gamma \le t\}$ и ПР $v(t)$. После обнаружения отказа в одном из компонентов начинается его восстановление, контроль отключается. Время восстановления компонентов – СВ β_1 и β_2 с ФР $G_1(t)=P\{\beta_1 \le t\}$ и $G_2(t)=P\{\beta_2 \le t\}$ и ПР $g_1(t)$, $g_2(t)$ соответственно. В случае восстановления обоих компонентов система приступает к работе после восстановления последнего. После восстановления все свойства компонентов полностью обновляются.

Для описания ее функционирования исходной системы введем следующее пространство полумарковских состояний:

$$E=\{3111,\ 3111x_1,\ 3111x_2,\ 3111x_1x_2,\ 1011x_2z,\ 2101x_1z,\ 2001z,\ 1001z,$$
$$1322x_2,\ 2232x_1,\ 3330x_1z,\ 3000,\ 3030x_2,\ 3222,\ 3322x_1,\ 3300x_1,\ 3232x_2\},$$

где 3111 – система приступила к работе, оба компонента работоспособны, контроль включен; $1011x_2z$ – К1 отказал, К2 до отказа осталось работать время $x_2>0$ (без учета времени на отключение), до начала контроля осталось время $z>0$; $2101x_1z$ – К2 отказал, К1 до отказа осталось работать время $x_1>0$, до начала контроля осталось время $z>0$; $3330x_1x_2$ – начался контроль, работа К1 и К2 приостановлена, до отказа К1 осталось работать время $x_1 > 0$, до отказа К2 осталось работать время $x_2 > 0$; $3030x_2$ – начался контроль, К1 в отказе, до отказа К2 осталось работать время $x_2 > 0$; $2001z$ – К1 в отказе, отказал К2, до начала контроля осталось время $z > 0$; $3300x_1$ – контроль включился, работа К1 приостановлена, до отказа К1 осталось работать время $x_1 > 0$, К2 в отказе; $1001z$ – отказал К1, К2 в отказе, до начала контроля осталось время $z > 0$; $3232x_2$ – в К1 обнаружен отказ, началось его восстановление, до отказа К2 осталось работать время $x_2 > 0$, контроль приостановлен; $3322x_1$ – в К2 обнаружен отказ, началось его восстановление, до отказа К1 осталось работать время $x_1 > 0$, контроль приостановлен; $3111x_2$ – К1 восстановился и начал работу, К2 возобновил работу, до отказа К2 осталось работать время $x_2 > 0$; 3000 – К1 и К2 в отказе, начался контроль; 3222 – обнаружены отказы К1 и К2, началось их восстановление, контроль приостановлен; $1322x_2$ – К1 восстановился, до восстановления К2 осталось время $x_2 > 0$; $2232x_1$ – К2 восстановился, до восстановления К1 осталось время $x_1 > 0$; $3111x_1$ – К2 восстановился и начал работу, К1 возобновил работу, до отказа К1 осталось работать время $x_1 > 0$; $3111x_1x_2$ – контроль закончился, К1 возобновил работу, до отказа К1 осталось время $x_1> 0$, К2 возобновил работу, до отказа К2 осталось работать время $x_2 > 0$.

Для определения стационарных характеристик системы воспользуемся приближенным методом, основанным на АФУ. В качестве опорной системы S_0 выберем систему с мгновенным контролем и мгновенным восстановлением, временная диаграмма функционирования которой приведена на рисунке 2.

Класс эргодических состояний опорной системы имеет вид:

$$E^0 = \{3111, 3111x_1, 3111x_2, 3111x_1x_2, 1011x_2z, 2101x_1z, 1001z, 2001z\}.$$

Для исходной системы множества работоспособных состояний E_+ и отказовых состояний E_- имеют вид: $E_+ = \{3111, 3111x_1, 3111x_2, 3111x_1x_2\}$,

$$E_- = \{3330x_1x_2, 3300x_1, 3322x_1, 3000, 3232x_2, 3222, 2101x_1z,$$

$$3030x_2, 1011x_2z, 1001z, 2001z, 1322x_2, 2232x_1\}.$$

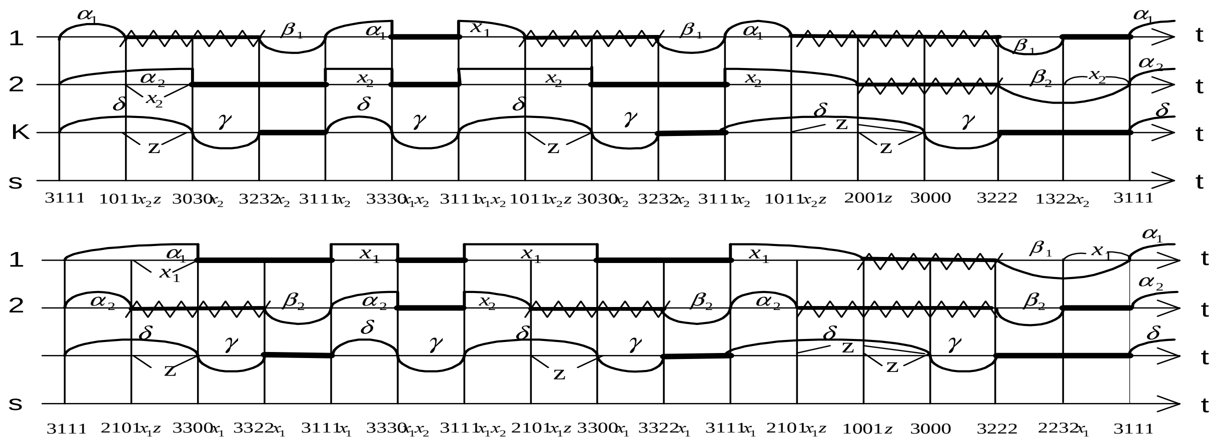


Рисунок 1 – Временная диаграмма функционирования исходной системы S

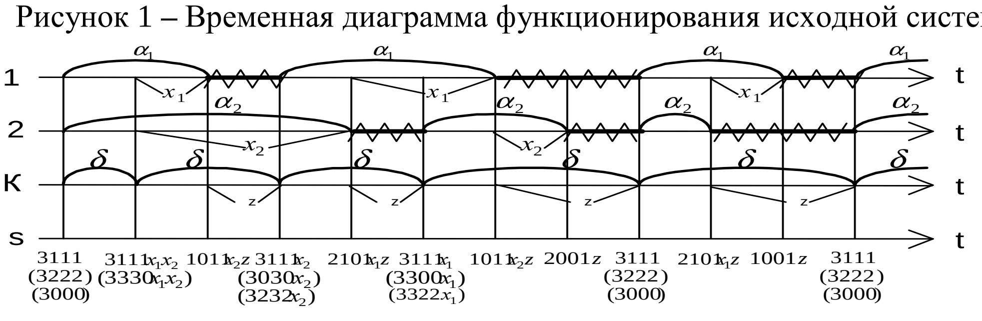


Рисунок 2 – Временная диаграмма функционирования опорной системы S_0

Найдем стационарные характеристики исходной системы S.

Вероятности переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ) $\{\xi_n, n \ge 0\}$ и средние времена пребывания в состояниях исходной системы определим из временной диаграммы функционирования исходной системы S, приведенной на рисунке 1, а стационарное распределение ВЦМ $\{\xi_n^{(0)}, n \ge 0\}$ – для опорной системы S_0.

Определим вероятности переходов ВЦМ $\{\xi_n, n \ge 0\}$ системы для состояния 3111:

$$p_{3111}^{1011x_2z} = \int_0^\infty f_1(t)\, f_2(t+x_2) r(t+z)dt,\quad p_{3111}^{2101x_1z} = \int_0^\infty f_1(t+x_1)\, f_2(t) r(t+z)dt,$$

$$p_{3111}^{3330x_1x_2} = \int_0^\infty f_1(t+x_1)\, f_2(t+x_2) r(t)dt,\quad x_1>0,\ x_2>0,\quad z>0. \qquad 1)$$

Для остальных состояний вероятности переходов определяются аналогично.

Средние времена пребывания в состояниях исходной системы имеют вид:

$$m(3111) = \int_0^\infty \overline{F}_1(t)\overline{F}_2(t)\overline{R}(t)dt\,;\ m(3111x_1x_2) = \int_0^{x_1\wedge x_2} \overline{R}(t)dt\,; m(3111x_1) = \int_0^{x_1} \overline{F}_2(t)\overline{R}(t)dt\,;$$

$$m(3322) = M\beta_2\,;\ m(3232x_2) = M\beta_1\,;\ m(1001z) = m(2001z) = z\,;\ m(2101x_1z) = x_1 \wedge z\,;$$

$$m(3330x_1x_2) = m(3300x_1) = m(3300) = m(3000) = M\gamma;\ m(1011x_2z) = x_2 \wedge z\,; \qquad (2)$$

$$m(3111x_2) = \int_0^{x_2} \overline{F}_1(t)\overline{R}(t)dt;\ m(3222) = \int_0^\infty \overline{G}_1(t)\overline{G}_2(t)dt;\ m(1322x_2) = x_2;\ m(2232x_1) = x_1.$$

Обозначим через $\rho(3111) = \rho_0$, значение стационарного распределения ВЦМ $\{\xi_n^{(0)}, n \ge 0\}$ на состоянии 3111 и предположим существование стационарной плотности

$$\varphi_1(x_1) = \rho(3111x_1)\,,\ \varphi_2(x_2) = \rho(3111x_2)\,,\ \varphi_3(x_1x_2) = \rho(3111x_1x_2)\,,\ \varphi_4(x_2z) = \rho(1010x_2z)\,,$$

$$\varphi_5(x_1z) = \rho(2100x_1z)\,,\ \varphi_6(z) = \rho(2000z)\,,\ \varphi_7(z) = \rho(1000z)$$

для состояний $3111x_1$, $3111x_2$, $3111x_1x_2$, $1010x_2z$, $2100x_1z$, $2000z$, $1000z$, соответственно.

Можно показать, что стационарное распределение ВЦМ $\{\xi_n^{(0)}, n \ge 0\}$ опорной системы S_0 определяется формулами:

$$\varphi_1(x_1) = \rho_0 \int_0^\infty f_1(x_1+y)h_2(y)dy + \rho_0 \int_0^\infty \gamma_1(x_1,t)dt \int_0^\infty f_2(t+y)h_1(y)dy +$$

$$+ \rho_0 \int_0^\infty \pi_1(x_1,y)dy \int_0^\infty f_1(y+t)h_2(t)dt + \rho_0 \int_0^\infty \pi_1(x_1,y)dy \int_0^\infty \gamma_1(y,t)dt \int_0^\infty f_2(t+z)h_1(z)dz,$$

$$\varphi_2(x_2) = \rho_0 \int_0^\infty f_2(x_2+y)h_1(y)dy + \rho_0 \int_0^\infty \gamma_2(x_2,t)dt \int_0^\infty f_1(t+y)h_2(y)dy +$$

$$+ \rho_0 \int_0^\infty \pi_2(x_2,y)dy \int_0^\infty f_2(y+t)h_1(t)dt + \rho_0 \int_0^\infty \pi_2(x_2,y)dy \int_0^\infty \gamma_2(y,t)dt \int_0^\infty f_1(t+z)h_2(z)dz,$$

$$\varphi_3(x_1x_2) = \rho_0 \int_0^\infty f_1(x_1+y)\, f_2(x_2+y)h_r(y)dy +$$

$$+ \int_0^\infty \varphi_1(x_1+t)\, f_2(x_2+t)h_r(t)dt + \int_0^\infty \varphi_2(x_2+t)\, f_1(x_1+t)h_r(t)dt,$$

$$\varphi_4(x_2z) = \rho_0 \int_0^\infty f_1(y)\, f_2(x_2+y)\nu_r(y,z)dy +$$

$$+\int_0^\infty \varphi_1(t)\, f_2(x_2+t)\nu_r(t,z)dt + \int_0^\infty \varphi_2(x_2+t)\, f_1(t)\nu_r(t,z)dt, \qquad (3)$$

$$\varphi_5(x_1 z) = \rho_0 \int_0^\infty f_1(x_1+y)\, f_2(y)\nu_r(y,z)dy +$$

$$+\int_0^\infty \varphi_1(x_1+t)\, f_2(t)\nu_r(t,z)dt + \int_0^\infty \varphi_2(t)\, f_1(x_1+t)\nu_r(t,z)dt,$$

$$\varphi_6(z) = \int_0^\infty \varphi_4(t,t+z)dt, \qquad \varphi_7(z) = \int_0^\infty \varphi_5(t,t+z)dt.$$

Введем обозначение

$$\bar{i} = \begin{cases} 1, если\ i=2, \\ 2, если\ i=1. \end{cases} \qquad (4)$$

В системе решений (3) ρ_0 находится их условия нормировки; $h_r(t) = \sum_{n=1}^{\infty} r^{*(n)}(t)$ – плотность функции восстановления, $r^{*(n)}(t)$ – n-кратная свертка функции $r(t)$; $\nu_r(z,x) = r(z+x) + \int_0^z r(z+x-s)h_r(s)ds$ – плотность распределения прямого остаточного времени для процесса восстановления; с учетом (4), $h_i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{\gamma}_i^{*(n)}(t)$ – плотность функции восстановления, $\tilde{\gamma}_i^{*(n)}(t)$ – n-кратная свертка функции $\tilde{\gamma}_i(t) = \int_0^t f_i(t)\nu_r(y,t-y)dy$;

$$\pi_i(x,y) = \sum_{n=1}^{\infty} k_i^{*(n)}(x,y), \quad k_i^{(1)}(x,y) = k_i(x,y) = \int_0^\infty \gamma_i(x,t)\gamma_{\bar{i}}(t,y)dt, \quad k_i^{(n)}(x,y) = \int_0^\infty k_i(x,t)k_i^{(n-1)}(t,y)dy;$$

$$\gamma_i(x,t) = \int_0^\infty f_i(x+z+t)\nu_r(t,z)dz + \int_0^\infty h_{\bar{i}}(y)dy \int_0^\infty f_i(x+z+y+t)\nu_r(t,z)dz.$$

Среднюю стационарную наработку на отказ T_+ и среднее стационарное время восстановления T_- найдем по формулам [2], для данной системы они примут вид:

$$T_+ \approx \frac{\int_{E_+} m(e)\rho(de)}{\int_{E_+} P(e,E_-)\rho(de)}, \quad T_- \approx \frac{\int_{E_-} m(e)\rho(de)}{\int_{E_+} P(e,E_-)\rho(de)},$$

где $\rho(de)$ - стационарное распределение опорной ВЦМ $\{\xi_n^{(0)}, n \ge 0\}$; $m(e)$ - средние времена пребывания в состоянии $e \in E$ исходной системы; $P(e,E)$ - вероятности переходов ВЦМ $\{\xi_n, n \ge 0\}$ исходной системы.

Таким образом, с учетом формул (1), (2) и (3), средняя стационарная наработка на отказ T_+ имеет вид:

$$T_+ \approx \frac{M(\alpha_1 \wedge \alpha_2) + \int_0^\infty \overline{F}_2(t)\overline{\Phi}_1(t)dt + \int_0^\infty \overline{F}_1(t)\overline{\Phi}_2(t)dt}{\int_0^\infty \overline{F}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y) + \int_0^\infty \overline{\Phi}_2(y)\overline{F}_1(y)dH_r(y) + \int_0^\infty \overline{\Phi}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y)}. \qquad (5)$$

Здесь

$$\overline{\Phi}_i(x) = \int_0^\infty \overline{F}_i(x+y)h_{\bar i}(y)dy + \int_0^\infty \overline{\Gamma}_i(x,y)dy\int_0^\infty f_i(y+z)h_i(z)dz +$$

$$+\int_0^\infty \overline{\Pi}_i(x,y)dy\int_0^\infty f_i(y+z)h_{\bar i}(z)dz + \int_0^\infty \overline{\Pi}_i(x,y)dy\int_0^\infty \gamma_i(y,z)dz\int_0^\infty f_{\bar i}(z+s)h_i(s)ds\,,$$

причем $\overline{\Gamma}_i(y,z) = \int_y^\infty \gamma_i(x,z)dx\,,\ \overline{\Pi}_i(t,z) = \int_t^\infty \pi_i(x,z)dx\,.$

Среднее стационарное время восстановления T_-, с учетом формул (1), (2) и (3), определяется формулой:

$$T_- \approx \Bigg[(M\delta + M\gamma)\left(\int_0^\infty \overline{F}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y) + \int_0^\infty \overline{\Phi}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y) + \right.$$

$$\left. + \int_0^\infty \overline{\Phi}_2(y)\overline{F}_1(y)d\hat{H}_r(y)\right) + M(\beta_1 \wedge \beta_2) + M\beta_1\overline{\Phi}_2(0) + M\beta_2\overline{\Phi}_1(0) -$$

$$- M(\alpha_1 \wedge \alpha_2) - \int_0^\infty \overline{\Phi}_1(y)\overline{F}_2(y)dy - \int_0^\infty \overline{\Phi}_2(y)\overline{F}_1(y)dy\Bigg] \Bigg/ \left(\int_0^\infty \overline{F}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y) + \right.$$

$$\left. + \int_0^\infty \overline{\Phi}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y) + \int_0^\infty \overline{\Phi}_2(y)\overline{F}_1(y)d\hat{H}_r(y)\right). \qquad (6)$$

Здесь, с учетом (4),

$$\overline{\Phi}_i(0) = \int_0^\infty \overline{F}_i(y)h_{\bar i}(y)dy + \int_0^\infty \overline{\Gamma}_i(0,y)dy\int_0^\infty f_{\bar i}(y+z)h_i(z)dz +$$

$$+\int_0^\infty \overline{\Pi}_i(0,y)dy\int_0^\infty f_i(y+z)h_{\bar i}(z)dz + \int_0^\infty \overline{\Pi}_i(0,y)dy\int_0^\infty \gamma_i(y,z)dz\int_0^\infty f_{\bar i}(z+s)h_i(s)ds\,,$$

Причем $\overline{\Gamma}_i(0,z) = \int_0^\infty \gamma_i(x,z)dx\,;\qquad \overline{\Pi}_i(0,z) = \int_0^\infty \pi_i(x,z)dx\,.$

Стационарный коэффициент готовности, с учетом формул (5) и (6), найдем из соотношения:

$$K_г \approx \left[M(\alpha_1 \wedge \alpha_2) + \int_0^\infty \overline{F}_2(t)\overline{\Phi}_1(t)dt + \int_0^\infty \overline{F}_1(t)\overline{\Phi}_2(t)dt\right] \Big/ \Big[(M\delta + M\gamma)\times$$

$$\times\left(\int_0^\infty \overline{F}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y) + \int_0^\infty \overline{\Phi}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y) + \int_0^\infty \overline{\Phi}_2(y)\overline{F}_1(y)d\hat{H}_r(y)\right) + \qquad (7)$$

$$+ M(\beta_1 \wedge \beta_2) + M\beta_1\overline{\Phi}_2(0) + M\beta_2\overline{\Phi}_1(0)\Big].$$

Найдем экономические критерии, такие как средняя удельная прибыль S в единицу календарного времени и средние удельные затраты C в единицу времени исправного функционирования системы. Для их определения воспользуемся формулами [3]:

$$S \approx \frac{\int_E m(e)f_S(e)\rho(de)}{\int_E m(e)\rho(de)}, \quad C \approx \frac{\int_E m(e)f_C(e)\rho(de)}{\int_{E_+} m(e)\rho(de)},$$

где $f_S(e)$ и $f_C(e)$ – функции, определяющие соответственно доход и затраты в каждом состоянии.

Пусть c_1 – прибыль, получаемая в единицу времени функционирования; c_2 – затраты в единицу времени на контроль; c_3 – затраты в единицу времени восстановления; c_4 – потери в единицу времени от брака. Для исходной ПС функции $f_s(e)$ и $f_c(e)$ имеют следующий вид:

$$f_s(e)=\begin{cases} c_1,\ e\in\{3111, 3111x_1x_2, 3111x_1, 3111x_2\}, \\ -c_2,\ e\in\{3232x_2, 3222, 3322x_1, 1322x, 2232x\}, \\ -c_3,\ e\in\{3030x_2, 3330x_1x_2, 3000, 3300x_1\}, \\ -c_4,\ e\in\{1011x_2z, 2001z, 2101x_1z, 1001z\}, \end{cases} \tag{8}$$

$$f_c(e)=\begin{cases} 0,\ e\in\{3111, 3111x_1x_2, 3111x_1, 3111x_2\}, \\ c_2, e\in\{3232x_2, 3222, 3322x_1\}, \\ c_3,\ e\in\{3030x_2, 3330x_1x_2, 3000, 3300x_1\}, \\ c_4, e\in\{1011x_2z, 2001z, 2101x_1z, 1001z\}. \end{cases}$$

С учетом формул (2), (3) и (8) средняя удельная прибыль и средние удельные затраты определяются соотношениями:

$$S\approx\Bigg[(c_1+c_4)\left(M(\alpha_1\wedge\alpha_2)+\int_0^\infty\overline{F}_2(t)\overline{\Phi}_1(t)dt+\int_0^\infty\overline{F}_1(t)\overline{\Phi}_2(t)dt\right)-(c_3M\gamma+c_4M\delta)\times$$
$$\times\left(\int_0^\infty\overline{F}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y)+\int_0^\infty\overline{\Phi}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y)+\int_0^\infty\overline{\Phi}_2(y)\overline{F}_1(y)dH_r(y)\right)-$$
$$-c_2\left(M(\beta_1\wedge\beta_2)+M\beta_1\overline{\Phi}_2(0)+M\beta_2\overline{\Phi}_1(0)\right)\Bigg]\Bigg/\Bigg[(M\gamma+M\delta)\Bigg(\int_0^\infty\overline{F}_1(y)\overline{F}_2(y)d\hat{H}_r(y)+$$
$$+\int_0^\infty\left(\overline{\Phi}_1(y)\overline{F}_2(y)+\overline{\Phi}_2(y)\overline{F}_1(y)\right)d\hat{H}_r(y)\Bigg)+M(\beta_1\wedge\beta_2)+M\beta_1\overline{\Phi}_2(0)+M\beta_2\overline{\Phi}_1(0)\Bigg], \tag{9}$$

$$C\approx\Bigg(\Bigg[(c_3M\gamma+c_4M\delta)\int_0^\infty(\overline{F}_1(y)\overline{F}_2(y)+\overline{\Phi}_1(y)\overline{F}_2(y)+\overline{\Phi}_2(y)\overline{F}_1(y))d\hat{H}_r(y)+$$
$$+c_2\left(M(\beta_1\wedge\beta_2)+M\beta_1\overline{\Phi}_2(0)+M\beta_2\overline{\Phi}_1(0)\right)\Bigg]\Bigg/\Bigg[M(\alpha_1\wedge\alpha_2)+$$
$$+\int_0^\infty\overline{F}_2(t)\overline{\Phi}_1(t)dt+\int_0^\infty\overline{F}_1(t)\overline{\Phi}_2(t)dt\Bigg]\Bigg)-c_4\,. \tag{10}$$

Формулы (8)-(10) позволяют находить значения стационарных надежностных и экономических характеристик при различных исходных данных. Исходные данные и результаты вычислений сведены в таблицу 1, СВ времени безотказной работы первого и второго компонентов имеют экспоненциальное распределение и неслучайное время периодичности контроля $\tau>0$, среднее время восстановления: $M\beta_1=0{,}100$ *ч*, $M\beta_2=0{,}060$ *ч*, длительность контроля $M\gamma=0{,}125$ *ч*, $c_1=5$ *у.е.*, $c_2=4$ *у.е.*, $c_3=3$ *у.е.*, $c_4=2$ *у.е.*

Таблица 1 – Значения $K_г(\tau)$, $S(\tau)$, $C(\tau)$ при $\tau=5$ *ч*.

Исходные данные		Результаты вычислений		
$M\alpha_1$, ч	$M\alpha_2$, ч	$K_г(\tau)$	$S(\tau)$, у.е./ч	$C(\tau)$, у.е./ч
90	70	0,915	4,352	0,242
90	50	0,902	4,262	0,274
90	10	0,746	3,165	0,756

Для данной системы при тех же исходных данных были получены значения стационарного коэффициента готовности без применения АФУ. Сравнительные результаты, по которым можно оценить точность расчетов при использовании АФУ, занесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Сравнительные результаты

Вид распределения показательный	$K_г(\tau)$, вычисленный по формуле (7)	$K_г(\tau)$, вычисленный без АФУ	Погрешность
$M\alpha_1 = 90ч;\ M\alpha_2 = 70ч$	0.91474	0.91476	0.002 %
$M\alpha_1 = 90ч;\ M\alpha_2 = 50ч$	0.90188	0.90191	0.003 %
$M\alpha_1 = 90ч;\ M\alpha_2 = 10ч$	0.74550	0.74559	0.009 %

Полученные результаты могут быть использованы при нахождении качественных характеристик функционирования многокомпонентной системы, а также для определения оптимального периода проведения контроля для различных законов распределения параметров системы.

Библиографический список использованных источников

1. Королюк В.С. Стохастические модели систем / В.С. Королюк. – К.: Либідь, 1993. – 136 с.

2. Копп В.Я. Стохастические модели автоматизированных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевГТУ , 2000. – 284 с.

3. Корлат А.Н. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания / А.Н. Корлат, В.Н. Кузнецов, А.Ф. Турбин. – Кишинёв: Штиинца, 1991. – 209 с.

УДК 62–50
Л. А. Краснодубец, д–р техн. наук, профессор,
Э. О. Балаканов, аспирант
Севастопольский национальный технический университет, г.Севастополь, Украина
lakrasno@gmail.com

КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

Введение

Процессы управления в системах автоматизации производственными процессами связаны с изменением и преобразованием энергии. По этой причине представляется естественным разрабатывать алгоритмы управления динамическими объектами на основе энергетических критериев. В этой связи следует отметить цикл работ П.Д. Крутько, главные результаты которых окончательно сформулированы им в виде «новых технологий аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением» [1]. Эти технологии, основанные на применении концепций обратных задач динамики в сочетании с оптимизацией по локальным квадратическим критериям, имеющим физический смысл механической энергии, позволяют аналитическим путем конструировать законы управления для непрерывных регуляторов в форме с обратными связями на основе минимизации кинетической энергии или энергии ускорения. Системы управления с такими регуляторами имеют в своем составе информационно-измерительный канал, структуру которого образуют обратные связи, поставляющие данные о текущем состоянии объекта управления. Эти данные используются для оптимизации управляющей функции при помощи минимизации локальных критериев, содержащих разность энергий эталонной модели и объекта управления, что делает систему управления адаптивной и придает ей робастные свойства.

В настоящей работе исследуется система управления двигателем постоянного тока (ДПТ) с регуляторами, реализующими законы управления в форме информационных каналов (обратных связей), построенных на основе различных энергетических критериев.

1. Постановка задачи

Пусть ДПТ с независимым возбуждением описывается дифференциальными уравнениями

$$u_a = R_a(T_a \frac{di_a}{dt} + i_a) + e_a\,,\ J\frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H\,,\ \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}\,,\ e_a = k_E\omega_m\,,\ M = k_M i_a\,,$$

где u_a, i_a, e_a – напряжение, ток и противоЭДС якоря; $L_a, R_a, T_a = L_a / R_a$ – индуктивность, сопротивление и постоянная времени цепи якоря; $\omega_m, M, M_H, \theta_m$ – угловая скорость вращения ротора, электромагнитный момент, момент нагрузки и угол поворота ротора; J, k_E, k_M – момент инерции ротора и конструктивные постоянные.

Приведем уравнения ДПТ к виду с начальными условиями

$$\ddot{n} + a_1\dot{n} + a_0 n = b_0 u;\ \ t = t_0,\ n(t_0) = n_0, \dot{n}(t_0) = \dot{n}_0\,, \tag{1}$$

где n – управляемая переменная (скорость вращения); u – управляющая функция; a_1, a_0 и b_0 – параметры.

Поставим задачу – сконструировать закон управления в форме с обратными связями, который обеспечит перевод объекта управления из начального $t_0 = 0$, $n_0 = 0$, $\dot{n}_0 = 0$ в требуемое стационарное состояние равновесия $t > 0$, $n = \overline{n} = const$, $\dot{n} = 0$. При этом необходимо, чтобы фазовые траектории обобщенных координат объекта проходили в малой окрестности фазовых траекторий координат эталонной модели

$$\ddot{n}^* + \alpha_1\dot{n}^* + \alpha_0 n^* = \alpha_0\overline{n};\ t = t_0, n^*(t_0) = n_0^*, \dot{n}^*(t_0) = \dot{n}_0^*\,,$$

а степень близости этих траекторий оценивались величинами критериальных функций

$$G(u) = \frac{1}{2}[\ddot{n}^*(t) - \ddot{n}(t,u)]^2, t \ge 0 \qquad (2)$$

или

$$K(u) = \frac{1}{2}[\dot{n}^*(t) - \dot{n}(t,u)]^2, t \ge 0, \qquad (3)$$

которые соответственно имеют физический смысл энергии ускорения [1] или кинетической энергии. В обоих случаях речь идет о нормированной по массе механической энергии.

2. Аналитическое конструирование законов управления

Решение поставленной задачи конструирования закона управления выполним аналитическим методом на основе минимизации критериальных функций (2) и (3). Вначале рассмотрим функцию (2). Для нахождения искомого решения воспользуемся методом простого градиента, для которого справедливо соотношение [1]

$$\frac{du}{dt} = -\lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u}, \qquad (4)$$

где $\lambda = const$ – характеризует скорость, с которой управляющая функция $u(t)$ приближается к оптимальному значению u_{opt}. Соотношение (4) путем вычисления производной в его правой части и с учетом критериальной функции (2) можно преобразовать к виду

$$\frac{du}{dt} = \lambda b_0 \left[\ddot{n}^* - \ddot{n}(t,u)\right], \qquad (5)$$

где $\ddot{n}^*$ – требуемое ускорение, которое формируется эталонной моделью; $\ddot{n}$ – текущее ускорение объекта управления; b_0 – коэффициент усиления объекта управления, входящий в уравнение (1).

Соотношение (5) определяет искомый закон управления в дифференциальной форме. Анализ уравнения (1) показывает, что изменение какого – либо из параметров объекта a_0, a_1, b_0 (или всех вместе) приводит к изменению производной $\ddot{n}(t,u)$, что в соответствии с (5) обеспечит адаптацию управления для новых условий функционирования системы. По этой причине закон управления (5), можно назвать законом прямого адаптивного управления. Структура регулятора, реализующего такой закон, формируется в ходе преобразования уравнения (5) к виду, удобному для технической реализации. Сначала с учетом (1) и (2) выражение (5) принимает вид

$$\frac{du}{dt} = \lambda b_0 \left[\alpha_0(\overline{n} - n^*) - \alpha_1 \dot{n}^* - \ddot{n})\right], \qquad (6)$$

где n^* и $\dot{n}^*$ – переменные эталонной модели, которые принимают участие в формировании управления. Заменой в (6) этих переменных соответствующими переменными, поступающими от объекта управления $n^* = n$ и $\dot{n}^* = \dot{n}$, формируется структура информационного канала обратной связи. Далее путем интегрирования при нулевых начальных условиях обеих частей модифицированного уравнения (6) получается окончательная форма (аналитическая структура) закона управления адаптивного регулятора в виде

$$u = \lambda b_0 \left[\alpha_0 \int_0^t (\overline{n} - n) dt - \alpha_1 n - \dot{n} \right], \qquad (7)$$

откуда следует структура информационного канала обратной связи.

По выражению (7) можно построить структурную схему адаптивного регулятора, которая изображена на рисунке 1.

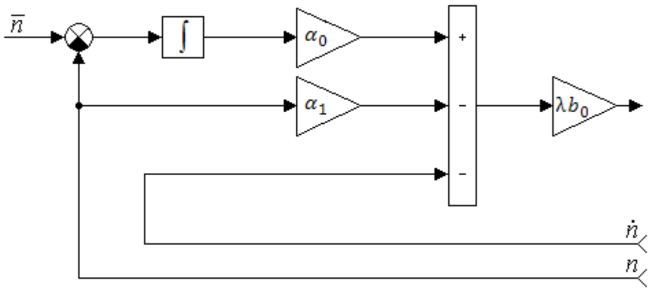


Рисунок 1 — Структурная схема адаптивного регулятора, соответствующая сконструированному закону управления (7)

Для случая, когда производная управляемой координаты системы непосредственно на объекте не измеряется, структурная схема, изображенная на рисунке 1, приводится к виду, показанному на рисунке 2.

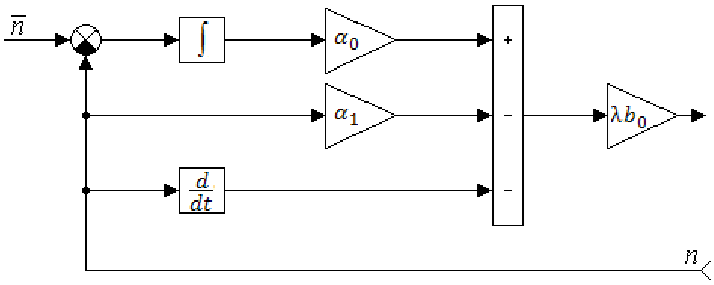


Рисунок 2 – Структурная схема адаптивного регулятора для случая, когда производная управляемой координаты на объекте не измеряется

Как следует из рисунка 2, элементный состав адаптивного регулятора соответствует составу традиционного ПИД – регулятора. При этом структуры обоих устройств заметно отличаются.

При рассмотрении критериальной функции (3) соотношение (4) примет вид

$$\frac{du}{dt} = -\lambda \frac{\partial K(u)}{\partial u}. \tag{8}$$

Вычисляя производную в правой части (8), с учетом (3), можно получить выражение закона управления в дифференциальной форме, который соответствует критериальной функции, имеющей смысл нормированной по массе кинетической энергии

$$\frac{du}{dt} = \lambda \frac{b_0}{a_1}\left[\dot{n}^*(t) - \dot{n}(t,u)\right]. \tag{9}$$

Далее в соотношении (9) выполним подстановку

$$\dot{n}^* = \frac{[\alpha_0(\bar{n} - n^*) - \ddot{n}^*]}{\alpha_1},$$

которая следует из уравнения эталонной модели, и произведем замены $n^* = n$; $\dot{n}^* = \dot{n}$; $\ddot{n}^* = \ddot{n}$, что будет соответствовать введению отрицательных обратных связей в управляемой системе [1]. Таким образом, соотношение (9) преобразуется к виду

$$\frac{du}{dt} = \lambda \frac{b_0}{a_1}\left[\frac{\alpha_0(\bar{n} - n) - \ddot{n}}{\alpha_1} - \dot{n}(t,u)\right]. \tag{10}$$

Интегрированием обеих частей (10) при нулевых начальных условиях получим окончательное выражение искомого закона управления, соответствующего критериальной функции (3), в форме с отрицательными обратными связями – по управляемой переменной n и её первой производной $\dot{n}$ в виде

$$u = \lambda \frac{b_0}{a_1}\left[\frac{\alpha_0}{\alpha_1}\int_0^t(\bar{n} - n)dt - \frac{1}{\alpha_1}\dot{n} - n\right]. \tag{11}$$

По выражению (11) можно построить структурную схему адаптивного регулятора, которая изображена на рисунке 3.

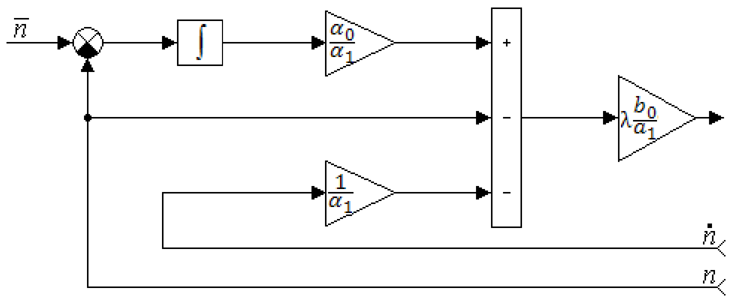


Рисунок 3 – Структурная схема адаптивного регулятора, реализующего сконструированный закон управления (11)

Если производная управляемой координаты системы непосредственно на объекте не измеряется, структурная схема, изображенная на рисунке 3, приводится к виду, представленному на рисунке 4.

Синтез параметров адаптивного регулятора, выполненный в соответствии с [2], сводится к расчёту коэффициентов α_0, α_1 эталонной модели и параметра λ.

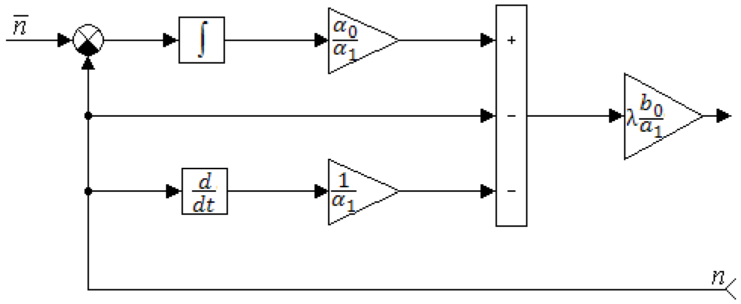


Рисунок 4 – Структурная схема адаптивного регулятора для случая, когда производная управляемой координаты не измеряется

3. Исследование САУ с различными законами управления

Исследование сконструированных законов управления выполнено методом моделирования в среде Matlab. При этом структурная схема ДПТ соответствует модели, приведенной в [3]. Схема моделирования САУ с адаптивным регулятором изображена на рисунке 5.

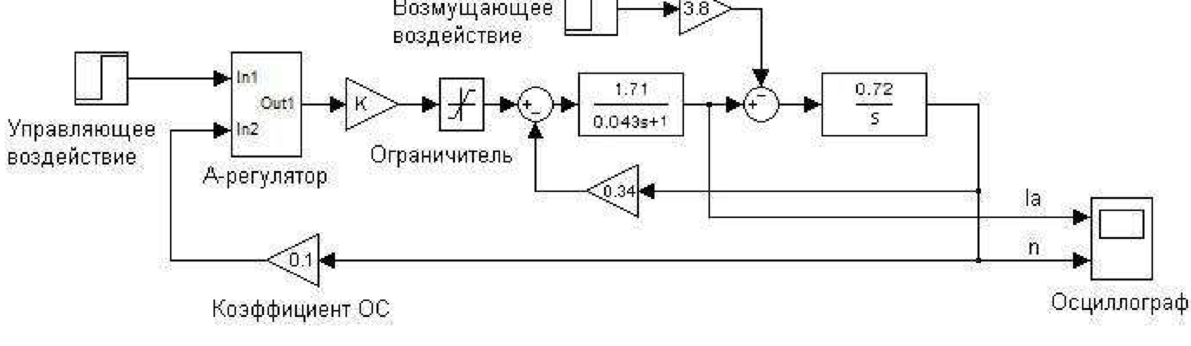


Рисунок 5 – Схема моделирования системы управления ДПТ с адаптивным регулятором

Внутренняя структура А–регулятора соответствует схемам, изображенным на рисунках 2 и 4.

Моделирование производилось при синтезированных параметрах регуляторов, обеспечивающих желаемое время переходной характеристики $t_p = 0{,}5c$ при перерегулировании $\sigma \le 5\%$. При использовании критериальной функции (2) параметры регулятора получили значения: $\lambda = 0{,}048$, $\alpha_0 = 196{,}9$, $\alpha_1 = 19{,}8$, а для критериальной функции (3) – $\lambda = 7{,}79$, $\alpha_0 = 9{,}9$, $\alpha_1 = 1$. При этом использовались параметры объекта: $b_0 = 28{,}8$ в первом случае и $a_1 = 23{,}25$, $b_0 = 28{,}8$ – во втором.

Результаты моделирования системы с адаптивным регулятором, структура которого построена на основе энергетического критерия (2), представлены в виде соответствующих переходных характеристик, изображённых на рисунках 6 и 7. Исследования выполнены при различных значениях постоянной времени T_a, а также при действии возмущения, приложенного в момент $t = 0{,}6c$.

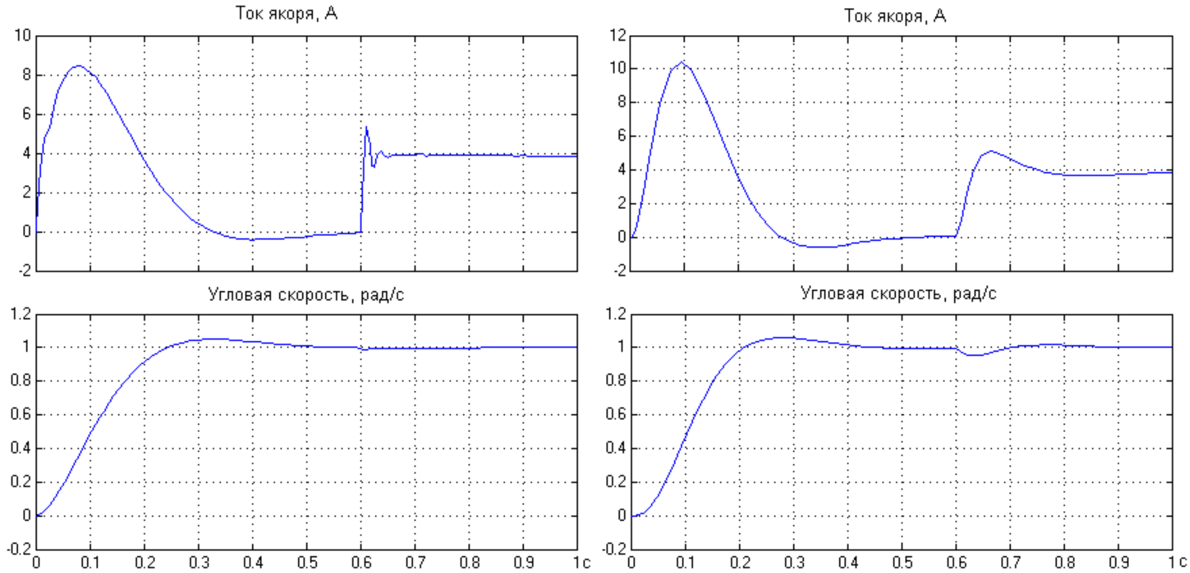


Рисунок 6 – Графики переходных характеристик системы с адаптивным регулятором, реализующим закон управления (7)

На рисунке 6 изображены графики переходных характеристик в системе с адаптивным регулятором, реализующим закон управления (7). На левых графиках приведены результаты моделирования при постоянной времени цепи якоря $T_a = 0{,}043c$, а на правом – при $T_a = 0{,}43c$. Следует отметить, что введением дополнительного усилителя в прямой цепи системы с коэффициентом усиления $K \ge 10$ можно добиться одинаковых результатов, проводимого эксперимента.

На рисунке 7 приведены результаты аналогичных исследований системы управления ДПТ с адаптивным регулятором, структура которого построена на основе энергетического критерия (3). Как следует из графиков, приведенных справа, значительное увеличение (на порядок) постоянной времени якорной цепи T_a при возмущении, приложенном в момент $t = 0{,}7c$, существенно снижает качество процесса управления.

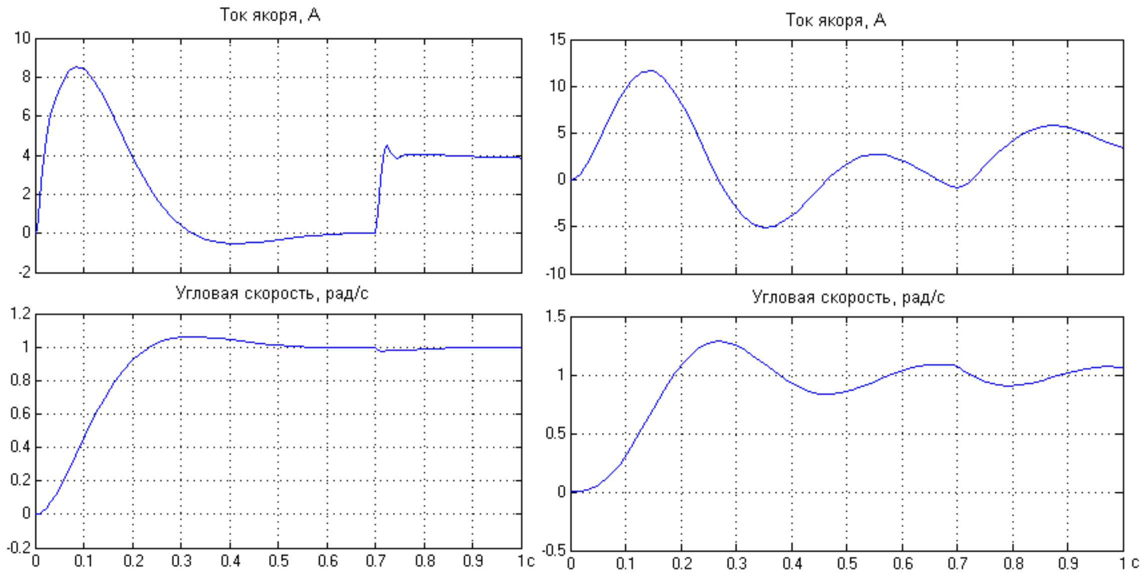


Рисунок 7 – Графики переходных характеристик системы с адаптивным регулятором, реализующим закон управления (11)

Заключение.

Динамические свойства САУ соответствуют желаемым показателям при нулевой статической ошибке при действии возмущения. Исследование робастных свойств систем с законами управления (7) и (11) показало, что существенное изменение одного из параметров объекта управления мало влияет на качество работы системы с регулятором, реализующим закон управления (7). Робастные свойства системы с законом управления (11) проявляются менее заметно. Для обоих типов регуляторов чувствительность САУ к параметрическим и непараметрическим возмущениям снижается с ростом усиления в прямой цепи.

Библиографический список использованных источников

1. Крутько П.Д. Новые технологии аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением // Управление, автоматизация и окружающая среда: Материалы междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 8-13 сентября 2008. – С. 4-24.

2. Краснодубец Л.А. Аналитическое конструирование адаптивных регуляторов на основе концепций обратных задач динамики и локальной оптимизации / Л.А. Краснодубец // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: Сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – Вып. 108. – С. 5-9.

3. Герман–Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман–Галкин. – СПб.: КОРОНА–Век, 2008. – 368 с.

УДК 004.03; +530.1

И.М. Гуревич, канд. техн. наук,
М.П. Евстигнеев, доктор физ.-мат.наук
Институт проблем информатики РАН, ООО «ГЕТНЕТ Консалтинг», г. Москва, Россия
iggurevich@gmail.com
Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь, Украина

ОЦЕНКИ ОБЪЕМА ИНФОРМАЦИИ В СОЕДИНЕНИЯХ ЦЕПЕЙ ДНК

Объем информации в молекулах

Методика оценки объема информации в молекулах заключается в следующем. Сначала оценивается объем информации в объектах нижнего уровня (лептонах и кварках). Согласно основному принципу квантовой механики Цайлингера [1] считаем, что в объектах нижнего уровня – фундаментальных частицах содержится 1 бит информации. Далее оценивается объем неопределенности (информации) в объектах второго уровня, который равен сумме объемов информации объектов нижнего уровня плюс объем информации, заключенной в структуре объекта второго уровня иерархии (мезоны, барионы). Объем информации в структуре объекта второго уровня оценивается по волновой функции объекта второго уровня и/или по графу, отображающему его структуру. Затем оценивается объем информации в объектах третьего уровня (атомах), который равен сумме объемов информации, входящих в его состав объектов предыдущих уровней, плюс объем информации, заключенной в структуре объекта последующего уровня иерархии (атомы). Объем информации в структуре объекта третьего уровня оценивается по волновой функции объекта третьего уровня. Затем оценивается объем информации в молекулах (объектах четвертого уровня, который равен сумме объемов информации, входящих в его состав объектов предыдущих уровней, плюс объем информации, заключенной в структуре молекулы. Объем информации в структуре молекулы оценивается по волновой функции молекулы или по соответствующему молекуле графу.

Объем информации в молекуле I_{ml} равен сумме объема информации в атомах $N_i I_{at\,i}$ и информации в структуре молекулы $I_{str\,ml}$: $I_{ml} = \sum N_i I_{at\,i} + I_{str\,ml}$, где N_{iat} – количество атомов типа i в молекуле, I_{iat} – объем информации в атоме типа i.

1. Оценка объема информации в структуре молекул.

Предлагается использовать оценку объема информации в структуре графа, соответствующей структуре молекулы $I_{gr} = \sum_{i=1}^{m} n_i \log_2 v_i$ приведенную в работах автора [2-5]. Здесь где m - количество классов топологически эквивалентных вершин графа (вершин заданной степени v_i), n_i – число вершин графа степени v_i. Данная оценка является оценкой сверху. Рассматриваемое количество направлений выхода из каждой вершины обеспечивает обход графа с использованием всех возможных путей (направлений перехода) от атома к атому.

Оценка объема информации в структуре графа, соответствующей структуре молекулы, использующая степени вершин, уменьшенные на единицу, $I'_{Gr} = \sum n_j \log_2(\nu_j - 1)$, является оценкой снизу.

Для сравнения рассмотрим оценки N. Rashevsky [6] и E. Trucco [7].

Оценка N. Rashevsky: $I_{gr} = -\sum_{i=1}^{m} w_i \log_2 w_i$, где m - количество классов топологически эквивалентных вершин графа, $w_i = \frac{n_i}{n}$ - вероятность принадлежности вершины графа к классу i. Объем информации в структуре однородного графа ($w_1 = 1$) равен нулю.

Оценка E. Trucco: $I_{gr} = -\sum_{i=1}^{m} w_i \log_2 w_i - \sum_{i=1}^{m} \gamma_i \log_2 \gamma_i$, где $\gamma_i = 1 - w_i$. Объем информации в структуре однородного графа ($w_1 = 1$) равен нулю.

2. Сравнение оценок объемов информации в структурах молекул по N. Rashevsky, E. Trucco и Gurevich

Сравнение оценок объемов информации по N. Rashevsky, E. Trucco и Gurevich в приведенных структурах молекул дано в таблице 1.).

Оценки объемов информации по N. Rashevsky и E. Trucco в графах, описывающих структуры молекул типа бутана практически не зависят о количества атомов углерода.

$I_{gr} = -(n/(3n+2)\log_2 n/(3n+2) + (2n+2)/(3n+2)\log_2 (2n+2)/(3n+2))$ (по Rashevsky),

$I_{gr} = -2(n/(3n+2)\log_2 n/(3n+2) + (2n+2)/(3n+2)\log_2 (2n+2)/(3n+2))$ (по Trucco

Таблица 1 – Сравнение оценок объемов информации в структуре молекул

Наименование молекулы	Оценка объема информации в структуре молекулы по Rashevsky (бит)	Оценка объема информации в структуре молекулы по Trucco (бит)	Оценка автора объема информации в структуре молекулы (бит)
Figure 3 [4]	1,5	2.622	3,585
Молекула типа бутана при большом количестве атомов углерода	0,918	1,836	2n

Таким образом, показано, что оценки объемов информации по N. Rashevsky и E. Trucco в структурах молекул, описываемых однородными графами, равны нулю. Оценки объемов информации по N. Rashevsky и E. Trucco в графах, описывающих структуры молекул типа бутана практически не зависят от количества в молекуле атомов углерода. Это представляется неадекватным реальности. Следовательно, объем информации в структурах молекул молекулах в целом целесообразно оценивать по методике Gurevich.

3. Оценки объема информации в соединениях цепей ДНК

Применим изложенную методику для оценки объема информации в соединениях цепей ДНК. Рассмотрим соединения цепей ДНК, приведенные в приложениях, обозначенные как AA1,AA2, AC1, AC2, AC3, AC4, ATcanon, CC1, CC2, GA1, GA2, GA3, GA4, GA5, ATcanon, GCnoncanon1, GCnoncanon2, GCnoncanon3, GG1, GG2, GG3, GT, TT1, TT2. Символ A обозначает основание аденин, символ C обозначает основание цитозин, символ G обозначает основание гуанин и символ T обозначает основание тимин. Пара символов обозначает спаривание соответствующих оснований [8]. Индекс canon обозначает специфическое спаривание оснований, при котором образуются две водородные связи между основаниями A (аденин) и T (тимин) и три водородные связи между основаниями G (гуанин) и C (цитозин). В природе в виде типового решения реализованы пары AT и GC. В статье рассматриваются спаривание (соединение) разнообразных пар оснований. Индексы указывают на конкретную реализацию спаривания (соединения).

Таблица 2 – Масса и объем информации во входящих в основания водороде, азоте, углероде, кислороде [2-4]

Элемент	Масса (а.е.)	Объем информации (бит)
Водород	1	10,422
Азот	14	138,908
Углерод	12	113,064
Кислород	16	149,33

Оценим объем информации в структуре оснований и в основаниях, формирующих соединения (таблица 3.).

Таблица 3 – Оценки массы и объема информации в структуре оснований и в основаниях, формирующих соединения

Основание	Формулы молекул, формирующих основание	Количество атомов формирующих основание	Масса основания (а.е.)	Объем информации в Структуре основания (бит)	Объем информации в основании (бит)
A	$H_4N_5C_5$	14	134	14,51	1301,55
C	$H_4N_3C_4O_1$	12	110	9,92	1060,00
G	$H_4N_5C_5O_1$	15	150	15,51	1450,88
T	$H_5N_2C_5O_2$	14	166	13,75	1193,91

Оценим объем информации в структуре соединения, связывающего основания в единое целое. Объем информации связывающей молекулы оснований равен объему информации в структуре соединения минус объем информации в структуре первой молекулы минус объем информации в структуре второй молекулы (таблица 4).

Таблица 4 – Оценка объема информации связывающей молекулы оснований

Обозначение соединения	Формулы молекул, формирующих соединение (левая, правая, полная)	Количество атомов в молекулах, формирующих соединение	Объем информации в структуре соединения	Объем информации связывающей молекулы оснований
1	2	3	4	5
AA1	$H_4N_5C_5$ $H_4N_5C_5$ $H_8N_{10}C_{10}$	28	32,19	3,17
AA2	$H_4N_5C_5$ $H_4N_5C_5$ $H_8N_{10}C_{10}$	28	32,19	3,17
AC1	$H_4N_3C_4O_1$ $H_4N_5C_5$ $H_8N_8C_8O_1$	26	26,02	1,59
AC2	$H_4N_3C_4O_1$ $H_4N_5C_5$ $H_8N_8C_8O_1$	26	26,02	1,59
AC3	$H_4N_3C_4O_1$ $H_4N_5C_5$ $H_8N_8C_8O_1$	26	27,60	3,17
AC4	$H_4N_3C_4O_1$ $H_4N_5C_5$ $H_8N_8C_8O_1$	26	25,85	1,42
ATcanon	$H_5N_2C_5O_2$ $H_3N_3C_5$ $H_8N_5C_{10}O_2$	28	31,43	3,17
CC1	$H_5N_3C_4O_1$ $H_4N_3C_4\ O_1$ $H_8N_6C_8O_2$	24	21,43	1,59
CC2	$H_5N_3C_4O_1$ $H_4N_3C_4\ O_1$ $H_8N_6C_8O_2$	24	21,85	2,01
GA1	$H_4N_5C_5$ $H_4N_5C_5O_1$ $H_8N_{10}C_{10}O_1$	29	33,19	3,17
GA2 AG	$H_4N_5C_5$ $H_4N_5C_5O_1$ $H_8N_{10}C_{10}O_1$	29	33,02	3

Продолжение таблицы 4

GA3 AG	$H_4N_5C_5$ $H_4N_5C_5O_1$ $H_8N_{10}C_{10}O_1$	29	33,19	3,17
GA4	$H_4N_5C_5O_1$ $H_4N_5C_5$ $H_8N_{10}C_{10}O_1$	29	33,02	3
GA5	$H_4N_5C_5O_1$ $H_4N_5C_5$ $H_8N_{10}C_{10}O_1$	29	31,60	1,58
GCcanon	$H_4N_3C_4O_1$ $H_4N_5C_5\ O_1$ $H_8N_8C_9O_2$	27	30,60	5,17
GCnoncanon1	$H_4N_3C_4O_1$ $H_4N_5C_5\ O_1$ $H_8N_8C_9O_2$	27	29,02	3,59
GCnoncanon2	$H_4N_3C_4O_1$ $H_4N_5C_5\ O_1$ $H_8N_8C_9O_2$	27	29,02	3,59
GCnoncanon3	$H_4N_3C_4O_1$ $H_4N_5C_5\ O_1$ $H_8N_8C_9O_2$	27	27,02	1,59
GG1	$H_4N_5C_5\ O_1$ $H_4N_5C_5\ O_1$ $H_8N_{10}C_{10}O_2$	30	34,19	3,17
GG2	$H_4N_5C_5\ O_1$ $H_4N_5C_5\ O_1$ $H_8N_{10}C_{10}O_2$	30	34,19	3,17
GG3	$H_4N_5C_5\ O_1$ $H_4N_5C_5\ O_1$ $H_8N_{10}C_{10}O_2$	30	34,19	3,17
GT	$H_4N_5C_5\ O_1$ $H_5N_2C_5\ O_3$ $H_8N_7C_{10}O_3$	29	32,43	3,17
TT1	$H_5N_2C_5\ O_2$ $H_5N_2C_5\ O_2$ $H_{10}N_{10}C_{10}O_4$	28	30,68	3,18
TT2	$H_5N_2C_5\ O_2$ $H_5N_2C_5\ O_2$ $H_{10}N_{10}C_{10}O_4$	28	30,68	3,18

Примечание. Объем информации связывающей две молекулы равен объему информации в структуре единой молекулы минус объем информации в структуре первой молекулы и минус объем информации в структуре второй молекулы.

Утверждение. *Объем информации связывающей две молекулы неотрицателен.*

Данное утверждение справедливо в физически очевидном предположении о том, что при соединении молекул образуются дополнительные связи и не теряются связи, взаимосвязывающие атомы в исходных молекулах.

В таблице 5 представлены оценки объема информации в структурах азотистых основанияй полученные по методикам Gurevich, Rashevsky, Trucco.

В таблице 6 представлены данные позволяющие сравнить оценки объема информации связывающей молекулы оснований по методикам Gurevich, Rashevsky, Trucco. Можно видеть, что методики Rashevsky и Trucco не дают представления о связи цепей ДНК (более того, они дают отрицательные оценки - характеризующие отталкивание) и тем самым неадекватны задачам исследования взаимосвязей органических молекул.

Таблица 5 – Оценки объема информации в молекулах оснований по методикам Gurevich, Rashevsky, Trucco.

		Gurevich	Rashevsky		Trucco
A	14	14,50978	1,78845	1,180726	2,969176
C	12	9,924813	1,483356	1,126404	2,60976
G	15	15,50978	1,806239	1,191352	2,997591
T	14	13,75489	1,95919	1,229881	3,189072

Таблица 6 – Сравнение оценок объема информации связывающей молекулы оснований по методикам Gurevich, Rashevsky, Trucco.

	Gurevich		Rashevsky		Trucco	
1	2	3	4	5	6	7
AA1	32,19	3,17	1,724408	-1,85249	2,870423	-3,06793
AA2	32,19	3,17	1,724408	-1,85249	2,870423	-3,06793
AC1	26,02	1,59	1,67624	-1,59557	2,827687	-2,75125
AC2	26,02	1,59	1,67624	-1,59557	2,827687	-2,75125
AC3	27,60	3,17	1,647869	-1,62394	2,781826	-2,79711
AC4	25,85	1,42	1,826245	-1,44556	3,022322	-2,55661
ATcanon	31,43	3,17	1,845366	-1,90228	3,037339	-3,12091
CC1	21,43	1,59	1,477334	-1,48938	2,599441	-2,62008
CC2	21,85	2,01	1,477334	-1,48938	2,599441	-2,62008
GA1	33,19	3,17	1,738525	-1,85616	2,894028	-3,07274
GA2	33,02	3	1,848181	-1,74651	3,043541	-2,92323
GA3	33,19	3,17	1,738525	-1,85616	2,894028	-3,07274
GA4	33,02	3	1,848181	-1,74651	3,043541	-2,92323
GA5	31,60	1,58	1,738525	-1,85616	2,931147	-3,03562
GCcanon	30,60	5,17	1,654319	-1,63528	2,795555	-2,8118
GCnoncanon1	29,02	3,59	1,698246	-1,59135	2,860535	-2,74682
GCnoncanon2	29,02	3,59	1,698246	-1,59135	2,860535	-2,74682
GCnoncanon3	27,02	1,59	1,698246	-1,59135	2,860535	-2,74682
GG1	34,19	3,17	1,746466	-1,86601	2,90872	-3,08646
GG2	34,19	3,17	1,746466	-1,86601	2,90872	-3,08646
GG3	34,19	3,17	1,746466	-1,86601	2,90872	-3,08646
GT	32,43	3,17	1,746466	-2,17192	2,918997	-3,26767
TT1	30,68	3,18	1,588983	-2,3294	2,60173	-3,77641
TT2	30,68	3,18	1,588983	-2,3294	2,60173	-3,77641

В колонках 2; 4; 6 указаны объемы информации в структурах пар азотистых соединений, полученные по методикам Gurevich, Rashevsky, Trucco. В колонках 3, 5; 7 указаны объемы информации в структурах соединений, связывающего основания в единое целое.

Приведенные оценки объема информации в соединениях цепей ДНК показывают, что реализованные в стандартных ДНК наиболее часто встречающиеся соединения имеют максимальный объем информации в структуре -11,924 и
18,679 бит.

Это обеспечивает максимально возможное количество путей, соединяющих цепи ДНК – максимальную надежность связей между цепями ДНК.

1. Суммарный объем информации в атомах и общий объем информации в данном случае не характеризует взаимодействие между цепями ДНК.
2. В таблицах 4-6 пары чисел- 1-4; 2-3; 3-6; 4-1 означают, что число вершин степени 1 равно 6, число вершин степени 2 равно 3, число вершин степени 3 равно 6, число вершин степени 4 равно 1.
3. В таблице 7 представлены оценки объема информации в структурах азотистых основанийяй полученные по методикам Gurevich, Rashevsky, Trucco
4. В таблице 8 представлены данные позволяющие сравнить оценки объема информации связывающей молекулы оснований по методикам Gurevich, Rashevsky, Trucco. Можно видеть, что методики Rashevsky и Trucco не дают представления о связи цепей ДНК (более того, они дают отрицательные оценки - характеризующие отталкивание) и тем самым неадекватны задачам исследования взаимосвязей органических молекул.

Заключение

1. Оценки объемов информации по N. Rashevsky и E. Trucco в структурах молекул, описываемых однородными графами, равны нулю. Оценки объемов информации по N. Rashevsky и E. Trucco в графах, описывающих структуры молекул типа бутана практически не зависят от количества в молекуле атомов углерода. Это представляется неадекватным реальности. Приведенное сравнение на примере пар азотистых соединений показывает, что связь молекул по N. Rashevsky и E. Trucco характеризуется отрицательным объемом информации.

Это, очевидно, неадекватно описанию объединения молекул. При формировании единой молекулы из двух объем информации в структуре должен возрастать (не может уменьшаться). Следовательно, объем информации в структурах молекул молекулах в целом целесообразно оценивать по методике автора.

2. Приведенные оценки объема информации в соединениях цепей ДНК показывают, что реализованные в стандартных ДНК наиболее часто встречающиеся соединения имеют максимальный объем информации в типовых соединениях, связывающего основания в единое целое.

3. Это обеспечивает максимально возможное количество путей, соединяющих цепи ДНК – максимальную надежность связей между цепями ДНК.

4. Суммарный объем информации в атомах и общий объем информации, в данном случае, не характеризует взаимодействие между цепями ДНК.

5. Предложенный авторами информационный подход к оценке взаимосвязи азотистых оснований носит универсальный характер и может быть использован для анализа взаимосвязи произвольных органических молекул.

Библиографический список использованных источников

1. Zeilinger A. A Foundational Principle for Quantum Mechanics" / A. Zeilinger // Foundations of Physics –1999. –29 (4). – P. 631-643.

2. Гуревич И.М. Оценка объема неопределенности (информации) в элементарных частицах, атомах и молекулах / И.М. Гуревич // Вестн. СевНТУ. Сер. Физика и математика: сб.научн.тр. – Севастополь, 2009. - Вып. 99. – С. 121-129.

3.Гуревич И.М. Информационные характеристики физических систем / И.М. Гуревич. – М.: «11-й ФОРМАТ». Севастополь. «Кипарис». – 2009. – 170 с.

4.Гуревич И.М. Информационные характеристики физических систем / И.М. Гуревич. – Севастополь: «Кипарис». – 2010. – 260 с.

5. Гуревич И.М. Оценка объема информации в структурах молекул и молекулах / И.М. Гуревич // Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы биологической физики и химии БФФХ-2011». Севастополь, 2011. – С. 185-187.

7. Rashevsky N. «Same Theorems in Topology and a Possible Biological Implication» / N. Rashevsky // Bulletin of mathematical biophysics. – 1956. – Volume 17. – P. 111-126.

8. Trucco E. «On the information content of graphs: compound symbols; different states for each point» / E. Trucco //Bulletin of mathematical biophysics. – 1956. – Volume 16. – P. 237-258.

8. Льюин Б. Гены / Б. Льюин. – М. : Мир. – 1987. – 544 с.

9. Гуревич И.М. Информация – всеобщее свойство материи. Характеристики. Оценки. Ограничения. Следствия / И.М. Гуревич, А.Д. Урсул. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». – 2012. – 312 с.

10. Гуревич И.М., Евстигнеев М.П., Пучков М.А. Автоматизация оценки объёма информации в структурах молекул и молекулах / И.М. Гуревич, М.П. Евстигнеев, М.А. Пучков. // Материалы междунар. научно-технич. конф. «Актуальные вопросы биологической физики и химии БФФХ-2012». – Севастополь, 2012. – С. 93-95.

11. Гуревич И.М. Оценка объёма информации в соединениях цепей ДНК/И.М. Гуревич // Материалы междунар. научно-технич. конф. «Актуальные вопросы биологической физики и химии БФФХ-2012». – Севастополь, 2011. – С. 90-92.

УДК 004.03; +530.1

И.М. Гуревич, канд. техн. наук,
В.Н. Павлов
Институт проблем информатики РАН, ООО «ГЕТНЕТ Консалтинг», г. Москва, Россия
iggurevich@gmail.com

ИНФОРМАТИКА И ХИМИЯ: ИНФОРМАЦИОННОЕ ДОПОЛНЕНИЕ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХИМИИ

«Хи́мия – одна из важнейших и обширных областей естествознания, наука о веществах, их свойствах, строении и превращениях, происходящих в результате химических реакций, а также фундаментальных законах, которым эти превращения подчиняются. Поскольку все вещества состоят из атомов, которые благодаря химическим связям способны формировать молекулы, то химия занимается в основном изучением взаимодействий между атомами и молекулами, полученными в результате таких взаимодействий. Предмет химии — химические элементы и их соединения, а также закономерности, которым подчиняются различные химические реакции. Химия имеет много общего с физикой и биологией, по сути граница между ними условна. Современная химия является одной из самых обширных дисциплин среди всех естественных наук» [1].

Моле́кула – электрически нейтральная частица, состоящая из двух или более связанных ковалентными связями атомов, наименьшая частица химического вещества, обладающая всеми его химическими свойствами. Обычно подразумевается, что молекулы нейтральны (не несут электрических зарядов) и не несут неспаренных электронов (все валентности насыщены); заряженные молекулы называют ионами, молекулы с мультиплетностью, отличной от единицы (то есть с неспаренными электронами и ненасыщенными валентностями) – радикалами. Молекулы относительно высокой молекулярной массы, состоящие из повторяющихся низкомолекулярных фрагментов, называются макромолекулами. Особенности строения молекул определяют физические свойства вещества, состоящего из этих молекул.

Состав молекул сложных веществ выражается при помощи химических формул. Структурная формула – это разновидность химической формулы, графически описывающая расположение и порядок связи атомов в соединении, выраженное на плоскости. Связи в структурных формулах обозначаются валентными черточками.

Хими́ческое соедине́ние – сложное вещество, состоящее из химически связанных атомов двух или нескольких элементов (гетероядерные молекулы). Некоторые простые вещества также могут рассматриваться как химические соединения, если их молекулы состоят из атомов, соединённых ковалентной связью.

Хими́ческая реа́кция – превращение одного или нескольких исходных веществ (реагентов) в отличающиеся от них по химическому составу или строению вещества (продукты реакции). В отличие от ядерных реакций, при химических реакциях ядра атомов не меняются, в частности не изменяется их общее число, изотопный состав химических элементов, при этом происходит перераспределение электронов и ядер и образуются новые химические вещества.

Методика оценки объема информации в молекулах

Методика оценки объема информации в молекулах заключается в следующем. Сначала оценивается объем информации в объектах нижнего уровня (лептонах и кварках). Согласно основному принципу квантовой механики Цайлингера [2] считаем, что в объектах нижнего уровня – фундаментальных частицах содержится 1 бит информации. Далее оценивается объем неопределенности (информации) в объектах второго уровня, который равен сумме объемов информации объектов нижнего уровня плюс объем информации, заключенной в структуре объекта второго уровня иерархии (мезоны, барионы). Объем информации в структуре объекта второго уровня оценивается по волновой функции объекта второго уровня и/или по графу, отображающему его структуру. Затем оценивается объем информации в объектах третьего уровня (атомах), который равен сумме объемов информации, входящих в его состав объектов предыдущих уровней, плюс объем информации, заключенной в структуре объекта последующего уровня иерархии (атомы). Объем информации в структуре объекта третьего уровня оценивается по волновой функции объекта третьего уровня. Затем оценивается объем информации в молекулах (объектах четвертого уровня, который равен сумме объемов информации, входящих в его состав объектов предыдущих уровней, плюс объем информации, заключенной в структуре молекулы. Объем информации в структуре молекулы оценивается по волновой функции молекулы или по соответствующему молекуле графу.

Объем информации в молекуле I_{ml} равен сумме объема информации в атомах $N_i I_{at\ i}$ и информации в структуре молекулы $I_{str\ ml}$: $I_{ml} = \sum N_i I_{at\ i} + I_{str\ ml}$, где N_{iat} – количество атомов типа i в молекуле, I_{iat} – объем информации в атоме типа i.

Оценка объема информации в структуре молекул

Предлагается использовать оценку объема информации в структуре графа, соответствующей структуре молекулы $I_{gr} = \sum_{i=1}^{m} n_i \log_2 v_i$ приведенную в работах Гуревича И.М. [3-6]. Здесь где m - количество классов топологически эквивалентных вершин графа (вершин заданной степени v_i), n_i – число вершин графа степени v_i. Данная оценка является оценкой сверху. Рассматриваемое количество направлений выхода из каждой вершины обеспечивает обход графа с использованием всех возможных путей (направлений перехода) от атома к атому.

Оценка объема информации в структуре графа, соответствующей структуре молекулы, использующая степени вершин, уменьшенные на единицу, $I'_{Gr} = \sum n_j \log_2(\nu_j - 1)$, является оценкой снизу. Для сравнения рассмотрим оценки N. Rashevsky [7] и E. Trucco [8].

Оценка N. Rashevsky: $I_{gr} = -\sum_{i=1}^{m} w_i \log_2 w_i$, где m - количество классов топологически эквивалентных вершин графа, $w_i = \frac{n_i}{n}$ - вероятность принадлежности вершины графа к классу i. Объем информации в структуре однородного графа ($w_1 = 1$) равен нулю.

Оценка E. Trucco: $I_{gr} = -\sum_{i=1}^{m} w_i \log_2 w_i - \sum_{i=1}^{m} \gamma_i \log_2 \gamma_i$, где $\gamma_i = 1 - w_i$. Объем информации в структуре однородного графа ($w_1 = 1$) равен нулю.

Рассмотрим несколько примеров.

1.Оценка объема информации в структуре линейного графа, представленного на рисунке 1.

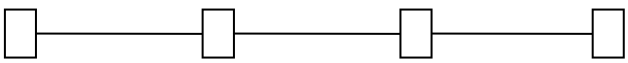


Рисунок 1 – Линейный граф, имеющий четыре вершины.

Две вершины имеют степень 1 и две вершины имеют степень 2. Объем информации в структуре графа равен 2 бита.

2. Оценка объема информации в структуре молекулы, представленной на Figure 3 [8]. $m = 3$; $w_1 = w_2 = 0,25$; $w_3 = 0,5$; $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,75$; $\gamma_3 = 0,5$.

3. Оценка объема информации в структуре молекулы метана CH_4, представленной на рисунке 2. Степени вершин графа, описывающего структуру молекулы метана, равны единице для вершин, соответствующих атомам водорода, и 4 для вершины, соответствующей атому углерода.

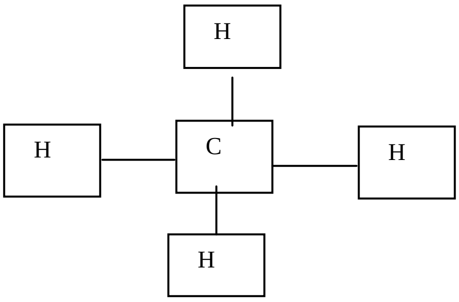


Рисунок 2 – Структура молекулы метана

Объем информации в структуре молекулы метана равен 2 бита.

4. Оценка объема информации в структуре молекулы бутана C_4H_{10} (CH_3–CH_2–CH_2–CH_3), представленной на рисунке 3. Для бутана десять вершин графа имеют степень 1 и четыре – степень 4. Объем информации в структуре молекулы бутана равен 8 бит.

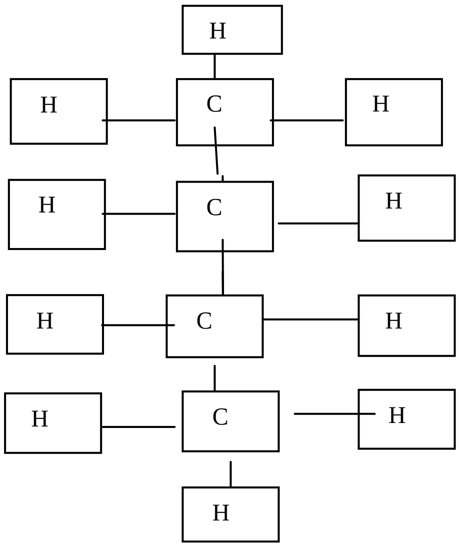


Рисунок 3 – Структура молекулы бутана

Сравнение оценок объемов информации в структурах молекул по N. Rashevsky, E. Trucco и Гуревича И.М.

Сравнение оценок объемов информации по N. Rashevsky, E. Trucco и Гуревича И.М. в приведенных структурах молекул дано в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение оценок объемов информации в структуре молекул

Наименование молекулы	Оценка объема информации в структуре молекулы по Rashevsky (бит)	Оценка объема информации в структуре молекулы по Trucco (бит)	Оценка Гуревича объема информации в структуре молекулы (бит)
Линейная молекула	1,0	2,0	2,0
Figure 3 [4]	1,5	2.622	3,585
Молекула метана	0,722	1,444	2,0
Молекула бутана	0,863	1,726241	8,0
Молекула типа бутана при большом количестве атомов углерода	0,918	1,836	2n

Оценки объемов информации по N. Rashevsky и E. Trucco в графах, описывающих структуры молекул типа бутана практически не зависят о количества атомов углерода.

$I_{gr} = -(n/(3n+2)\log_2 n/(3n+2) + (2n+2)/(3n+2)\log_2(2n+2)/(3n+2))$ (по Rashevsky),

$I_{gr} = -2(n/(3n+2)\log_2 n/(3n+2) + (2n+2)/(3n+2)\log_2(2n+2)/(3n+2))$ (по Trucco

Таким образом, показано, что оценки объемов информации по N. Rashevsky и E. Trucco в структурах молекул, описываемых однородными графами, равны нулю. Оценки объемов информации по N. Rashevsky и E. Trucco в графах, описывающих структуры молекул типа бутана практически не зависят от количества в молекуле атомов углерода. Это представляется неадекватным реальности. Следовательно, объем информации в структурах молекул, молекулах в целом целесообразно оценивать по методике Гуревича [9-11].

Химические реакции происходят при смешении или физическом контакте реагентов самопроизвольно, при нагревании, участии катализаторов (катализ), действии света (фотохимические реакции), электрического тока (электродные процессы), ионизирующих излучений (радиационно-химические реакции), механического воздействия (механохимические реакции), в низкотемпературной плазме (плазмохимические реакции) и т. п. Взаимодействие молекул между собой происходит по цепному маршруту: ассоциация – электронная изомеризация – диссоциация, в котором активными частицами являются радикалы, ионы, координационно-ненасыщенные соединения. Скорость химической реакции определяется концентрацией активных частиц и разницей между энергиями связи разрываемой и образуемой. Проанализируем изменение объема информации в различных типах реакций.

По типу превращений реагирующих частиц

Реакции соединения – химические реакции, в которых из двух или нескольких менее сложных по элементному составу веществ получается более сложное вещество.

Примеры реакций соединения:

$$C + O_2 = CO_2;$$

В структуре реагентов C и O_2 содержится 0 бит информации; в структуре продукта CO_2 содержится 1 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции соединения $C + O_2 = CO_2$ в структуре молекул реагентов не было информации, а в структуре молекулы продукта формируется 1 бит информации.

$$Na_2O + CO_2 = Na_2CO_3$$

В структуре каждой молекулы реагента Na_2O и CO_2 содержится 1 бит информации; в структуре продукта Na_2CO_3 содержится $\log_2 5$ бит информации.

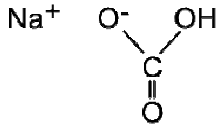
Следовательно, в ходе реакции соединения $Na_2O + CO_2 = Na_2CO_3$ в структуре молекул реагентов было 2 бита информации, а в структуре молекулы продукта формируется $\log_2 5$=2,322 бита информации.

$$NH_3 + CO_2 + H_2O = NH_4HCO_3.$$

Следовательно, в ходе реакции соединения $NH_3 + CO_2 + H_2O = NH_4HCO_3$ в структуре молекул реагентов NH_3,CO_2, H_2O было $\log_2 5$, 1, 1 битов информации, а в структуре молекулы продукта NH_4HCO_3 формируется $\lg_2 5$=2,322 бита информации.

$$CaO + H_20 = Ca(OH)_2$$

В структуре каждой молекулы реагентов Na_2O и CO_2 содержится 1 бит информации; в структуре продукта Na_2CO_3



содержится 2+3 = 5 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции соединения $Na_2O + CO_2 = Na_2CO_3$ в структуре молекул реагентов Na_2O; CO_2 было 2 бита информации, а в структуре молекулы продукта Na_2CO_3 формируется 5 бит информации.

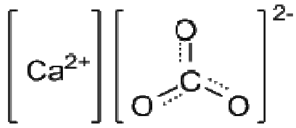
$$PЬO + Si0_2 = PbSi0_3$$

В структуре молекул реагентов PЬO; $Si0_2$ содержится 0; 1 бит информации; в структуре продукта $PbSi0_3$ содержится 2 бита информации.

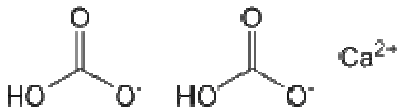
Следовательно, в ходе реакции соединения РЬО + $Si0_2 = PbSi0_3$ в структуре молекул реагентов был 1 бит информации, а в структуре молекулы продукта формируется 2 бита информации.

$$CaC0_3 + H_20 + C0_2 = Ca(HC0_3)_2$$

В структуре молекул реагентов карбоната кальция $CaC0_3$;



H_20; CO_2 содержится 2; 1; 1 бит информации; в структуре продукта гидрокарбонате кальция $Ca(HC0_3)_2$



содержится 10 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции соединения $CaC0_3 + H_20 + C0_2 = Ca(HC0_3)_2$ в структуре молекул реагентов было 4 бита информации, а в структуре молекулы продукта гидрокарбонате кальция $Ca(HC0_3)_2$ формируется 10 бит информации.

$$C_2H_4 + H_20 = C_2H_5OH$$

В структуре молекулы реагента C_2H_4; H_20 содержится $2\log_2 3 = 3{,}17$; 1 бит информации; в структуре продукта этаноле C_2H_5OH содержится 6 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции соединения $Na_2O + CO_2 = Na_2CO_3$ в структуре молекул реагентов было 4,17 бит информации, а в структуре молекулы продукта формируется 5 бит информации.

Вывод: При реализации реакций соединения из двух или нескольких менее сложных по элементному составу веществ получается более сложное вещество, которое содержит в структуре молекул продуктов больше информации, чем содержат в структуре молекул реагентов.

Реакции разложения – химические реакции, в которых из одного сложного по элементному составу вещества получаются два или несколько менее сложных веществ.

Примеры реакций разложения:

$$2Ag_2O = 4Ag + O_2$$

В структуре молекулы реагента Ag_2O содержится 1 бит информации; в структуре продуктов CO_2 содержится 0 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции разложения $2Ag_2O = 4Ag + O_2$ в структуре двух молекул реагентов было 2 бита информации, а в структуре молекул продуктов 0 бит информации.

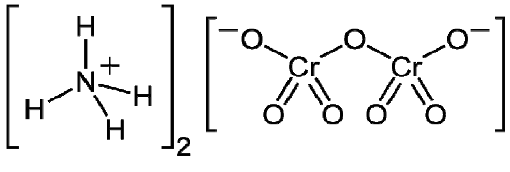
$$CaCO_3 = CaO + CO_2$$

В структуре молекулы реагента $CaCO_3$ содержится 2 бита информации; в структуре продуктов CaO, CO_2 содержится 0, 1 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции разложения $CaCO_3 = CaO + CO_2$ в структуре молекулы реагента $CaCO_3$ было 2 бита информации, а в структуре молекул продуктов CaO, CO_2 1 бит информации.

$$(NH_4)_2Cr_2O_7 = N_2 + Cr_2O_3 + 4H_2O$$

В структуре молекулы реагента дихромата аммония $(NH_4)_2Cr_2O_7$



содержится $2x2 + 2\log_2 6 + 5x1$ бит информации; в структуре продуктов N_2 , оксида хрома Cr_2O_3 , H_2O содержится 0, $\log_2 6 + 3$, 1 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции разложения $(NH_4)_2Cr_2O_7 = N_2 + Cr_2O_3 + 4H_2O$ в структуре молекулы реагента дихромата аммония $(NH_4)_2Cr_2O_7$ было 12,17 бита информации, а в структуре молекул продуктов $N_2 + Cr_2O_3 + 4H_2O$ 9,17 бит информации.

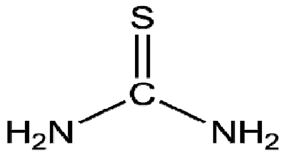
$$Cu(OH)_2 = CuO + H_20$$

В структуре молекулы реагента гидроксида меди $Cu(OH)_2$ содержится 3 бита информации; в структуре продуктов оксида меди CuO; воды H_20 содержится 0; 1 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции разложения $Cu(OH)_2 = CuO + H_20$ в структуре молекулы реагента гидроксида меди $Cu(OH)_2$ было 3 бита информации, а в структуре молекул продуктов CuO; H_20 содержится 1 бит информации.

$$NH_4Cl = NH_3 + HCl$$

В структуре молекулы реагента тиомочевины NH_4Cl

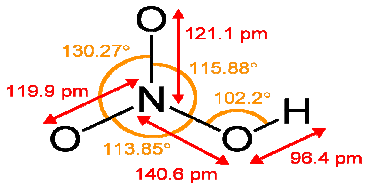


содержится $2+1+2x\log_2 3 = 3{,}17$ бита информации; в структуре продуктов аммиака NH_3; соляной кислоты HCl содержится $\log_2 3 = 1{,}585$; 1 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции разложения $NH_4Cl = NH_3 + HCl$ в структуре молекулы реагента гидроксида меди $Cu(OH)_2$ было 3 бита информации, а в структуре молекул продуктов NH_3; HCl содержится 2,585 бит информации.

$$\mathbf{4HN0_3 = 2H_20 + 4N0_2 + 0_2}$$

В структуре молекулы реагента азотной кислоты $4HN0_3$

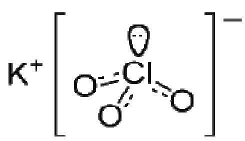


содержится $\log_2 6 = 2{,}585$ бита информации; в структуре продуктов H_20 ; $N0_2$; 0_2 содержится 1; 1; 0 бит информации.

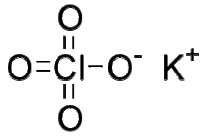
Следовательно, в ходе реакции разложения $4HN0_3 = 2H_20 + 4N0_2 + 0_2$ в структуре молекулы реагента гидроксида меди $Cu(OH)_2$ было 3 бита информации, а в структуре молекул продуктов CuO; H_20 содержится 2 бита информации.

$$4KClO_3 = 3KClO_4 + KCl$$

В структуре молекулы реагента хлората калия $KClO_3$



содержится $\log_2 7+1 = 2{,}807+1 = 3{,}807$ бита информации; в структуре продуктов перхлорада калия $KClO_4$



KCl содержится $\log_2 7+1 = 2{,}807+1 = 3{,}807$; 0 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции разложения $4KClO_3 = 3KClO_4 + KCl$ в структуре молекул реагента хлората калия $4KClO_3$ было 11,224 бит информации, а в структуре молекул продуктов $KClO_4$; KCl содержится 8,42 бит информации.

Вывод: При реализации реакций разложения получаются продукты, которые содержат в структуре молекул меньше информации, чем содержится в структуре молекулы-реагента.

Реакции замещения – химические реакции, в которых атомы или группы атомов одного из исходных веществ замещают атомы или группы атомов в другом исходном веществе.

Примеры реакций замещения:

$$CuSO_4 + Fe = FeSO_4 + Cu$$

В структуре молекул реагентов сульфате меди $CuSO_4$, Fe содержится 1 бит информации; в структуре продуктов CO_2 содержится 0 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции замещения $CuSO_4 + Fe = FeSO_4 + Cu$ в структуре двух молекул реагентов было 2 бита информации, а в структуре молекул продуктов 0 бит информации.

$$CaCO_3 + SiO_2 = CaSiO_3 + CO_2$$

В структуре молекул реагентов сульфате меди $CaCO_3$, SiO_2 содержится 2; 1 бит информации; в структуре продуктов $CaSiO_3$; CO_2 содержится 2; 1 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции замещения $CaCO_3 + SiO_2 = CaSiO_3 + CO_2$ в структуре двух молекул реагентов было 3 бита информации, а в структуре молекул продуктов 3 бит информации.

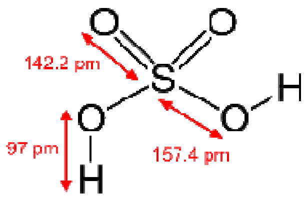
Вывод: При реализации реакций замещения получаются продукты, которые содержат в структуре молекул продуктов столько же информации, сколько содержится в структуре молекул-реагентов.

Реакции обмена – химические реакции, в которых исходные вещества как бы обмениваются своими составными частями.

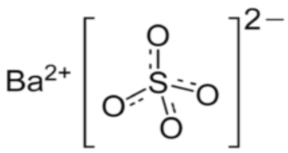
Примеры реакций обмена:

$$Ba(OH)_2 + H_2SO_4 = BaSO_4 + 2H_2O$$

В структуре молекул реагентов гидроксида бария $Ba(OH)_2$; серной кислоте H_2SO_4



содержится 3; 2+ $\log_2 6$ = 4,585 бит информации; в структуре продуктов $BaSO_4$;

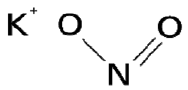


H_2O содержится $\log_2 6$ = 2,585; 1 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции обмена $Ba(OH)_2 + H_2SO_4 = BaSO_4 + 2H_2O$ в структуре двух молекул реагентов было 3 бита информации, а в структуре молекул продуктов 3 бит информации.

$$HCl + KNO_2 = KCl + HNO_2$$

В структуре молекул реагентов соляной кислоте HCl; нитриде калия KNO_2



содержится 0; 2+$\log_2 3$ = 2+1,585 бит информации; в структуре продуктов KCl; азотистой ки-

слоте

HNO_2 содержится 0; 2+$\log_2 3$ = 2+1,585 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции обмена $HCl + KNO_2 = KCl + HNO_2$ в структуре двух молекул реагентов было 3,585 бита информации, а в структуре молекул продуктов 3,585 бит информации.

$$AgNO_3 + NaCl = AgCl\ + NaNO_3$$

В структуре молекул реагентов нитрате серебра $AgNO_3$; NaCl содержится 2; 0 бит информации; в структуре продуктов AgCl; $NaNO_3$ содержится 0; 2 бита информации.

Следовательно, в ходе реакции обмена $AgNO_3 + NaCl = AgCl\ + NaNO_3$ в структуре двух молекул реагентов было 2 бита информации, а в структуре молекул продуктов 2 бита информации.

$$AgN0_3 + KB\text{г} = AgBr\ + KN0_3$$

В структуре молекул реагентов сульфате меди $AgN0_3$; Fe содержится 2; 1 бит информации; в структуре продуктов AgBr; нитрате калия $KN0_3$ содержится 0; 2 бита информации.

Следовательно, в ходе реакции обмена $AgN0_3 + KB\text{г} = AgBr\ + KN0_3$ в структуре двух молекул реагентов было 2 бита информации, а в структуре молекул продуктов сформировалось 2 бита информации.

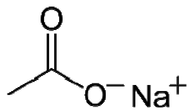
$$NaOH + HCl = NaCl + H_20$$

В структуре молекул реагентов гидрате натрия NaOH; соляной кислоты HCl содержится 1; 0 бит информации; в структуре продуктов NaCl; H_20 содержится 0; 1 бит информации.

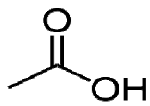
Следовательно, в ходе реакции обмена $NaCl + H_20$ в структуре двух молекул реагентов был 1 бит информации, а в структуре молекул продуктов сформировался 1 бит информации.

$$CH_3COONa + H_20{=}CH_3C0OH + NaOH$$

В структуре молекул реагентов ацетате натрия CH_3COONa;



H_20 содержится 5; 1 бит информации; в структуре продуктов: уксусной кислоте CH_3C0OH;



гидроксиде натрия NaOH содержится 5; 1 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции обмена $CH_3COONa + H_20{=}CH_3C0OH + NaOH$ в структуре двух молекул реагентов было 6 бит информации, а в структуре молекул продуктов сформировалось 6 бит информации.

Вывод: При реализации реакций обмена получаются продукты, которые содержат в структуре молекул продуктов столько же информации, сколько содержится в структуре молекул-реагентов.

Традиционная классификация химических реакций не охватывает все их разнообразие – кроме реакций четырех основных типов существует еще и множество более сложных реакций.

Выделение двух других типов химических реакций основано на участии в них двух важнейших нехимических частиц: электрона и протона. При протекании некоторых реакций происходит полная или частичная передача электронов от одних атомов к другим. При этом степени окисления атомов элементов, входящих в состав исходных веществ, изменяются. Эти реакции называются *окислительно-восстановительными*. **Окислительно-восстановительные реакции (ОВР)** – химические реакции, в которых происходит изменение степеней окисления атомов, входящих в состав реагирующих веществ. В другой группе реакций от одной реагирующей частицы к другой переходит ион водорода (H^+), то есть протон. Такие реакции называют *кислотно-основными реакциями* или *реакциями с передачей протона*. **Кислотно-основные реакции (КОР)** – химические реакции, сопровождающиеся передачей протона.

По тепловому эффекту

В ходе химических реакций происходит разрыв одних связей и образование других

Если сумма энергий разрушенных связей < суммы энергий вновь образованных —> избыток энергии выделяется в виде теплоты, света, работы расширяющихся газов.

$4AI + 30_2 \rightarrow 2A1_2O_3 + Q$ – теплота выделяется, **реакция экзотермическая**

$N_2 + 0_2 = 2NO - Q$ – теплота поглощается, **реакция эндотермическая**

Термохимические уравнения – с указанием теплового ффекта

$$2H_2 + 0_2 = 2H_20(ж) + 572 \text{ кДж}$$

В структуре молекул реагентов H_2; 0_2 содержится 0; 0 бит информации; в структуре продукта H_20; содержится 1 бит информации.

Следовательно, в ходе реакции обмена $2H_2 + 0_2 = 2H_20(ж) + 572$ кДж в структуре двух молекул реагентов было 0 бит информации, а в структуре молекулы продукта сформировалось 2 бита информации. При этом поглотилось 572 кДж теплоты.

Все реакции сопровождаются тепловыми эффектами. При разрыве химических связей в реагентах выделяется энергия, которая, в основном, идет на образование новых химических связей. В некоторых реакциях энергии этих процессов близки, и в таком случае общий тепловой эффект реакции приближается к нулю.

При химических реакциях сохраняется объем информации в атомах реагентов и продуктов (до и после реакции), но в общем случае изменяется объем информации в структурах молекул и в молекулах в целом.

Химические процессы, протекающие в веществе, отличаются и от физических процессов, и от ядерных превращений. В физических процессах каждое из участвующих веществ сохраняет неизменным свой состав (хотя вещества могут образовывать смеси), но могут изменять внешнюю форму или агрегатное состояние.

В химических процессах (химических реакциях) получаются новые вещества с отличными от реагентов свойствами, но никогда не образуются атомы новых элементов. В атомах же участвующих в реакции элементов обязательно происходят видоизменения электронной оболочки.

В ядерных реакциях происходят изменения в атомных ядрах всех участвующих элементов, что приводит к образованию атомов новых элементов.

«Хи́мия – одна из важнейших и обширных областей естествознания, наука о веществах, их свойствах, строении и превращениях, происходящих в результате химических реакций, а также фундаментальных законах, которым эти превращения подчиняются.

Учитывая изложенное в настоящей статье, следует дополнить общепринятое определение химии:

ХИМИЯ ЭТО НАУКА, ИЗУЧАЮЩАЯ СОДЕРЖАНИЕ И ИЗМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ В СТРУКТУРЕ МОЛЕКУЛ.

Точно также следует дополнить определение ядерной физики: ядерная физика это наука, изучающая содержание и изменение информации в фундаментальных и элементарных частицах, атомах.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие основные выводы.

1. Наряду с общепринятыми физическими и химическими характеристиками молекулы описываются информационными характеристиками, в частности, объемом информации в структуре молекул и молекулах.
2. Предложенная методика позволяет просто оценивать объем информации в структуре молекул на основании общепринятых структурных формул.
3. При реализации реакций соединения из двух или нескольких менее сложных по элементному составу веществ получается более сложное вещество, которое содержит в структуре молекул продуктов больше информации, чем содержат в структуре молекул реагентов.
4. При реализации реакций разложения получаются продукты, которые содержат в структуре молекул меньше информации, чем содержится в структуре молекулы-реагента.
5. При реализации реакций замещения получаются продукты, которые содержат в

структуре молекул продуктов столько же информации, сколько содержится в структуре молекул-реагентов.

6. Следует дополнить общепринятое определение химии: химия это наука, изучающая содержание и изменение информации в структуре молекул.

7. Точно также следует дополнить определение ядерной физики: ядерная физика это наука, изучающая содержание и изменение информации в фундаментальных и элементарных частицах, атомах, …

8. Использование предложенного информационного подхода к исследованию и синтезу молекул, в том числе, органических молекул, даст возможность уменьшить трудоемкость, время, стоимость исследований и создания новых материалов и лекарств, повысить их качество.

Библиографический список использованных источников

1. Хи́мия. Материал из Википедии – свободной энциклопедии http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%8F.
2. Zeilinger A. A Foundational Principle for Quantum Mechanics"/ A. Zeilinger // Foundations of Physics. – 1999. – 29 (4). – P. 631-643.
3. Гуревич И.М. Оценка объема неопределенности (информации) в элементарных частицах, атомах и молекулах / И.М. Гуревич // Вестн. СевНТУ. Сер. Физика и математика: сб.научн.тр. – Севастополь, 2009. – Вып. 99. – Стр.121-129.
4. 4.Гуревич И.М. Информационные характеристики физических систем / И.М. Гуревич. – М.: «11-й ФОРМАТ», М. «Кипарис». Севастополь. – 2009. – 170 с.
5. Гуревич И.М. Информационные характеристики физических систем./ И.М.Гуревич.– «Кипарис». Севастополь. – 2010. – 260 с.
6. Гуревич И.М. Оценка объема информации в структурах молекул и молекулах/ И.М. Гуревич // Материалы междунар. научно-технич. конф. «Актуальные вопросы биологической физики и химии БФФХ-2011». Севастополь, 2011. – С. 185-187.
7. Rashevsky N. «Same Theorems in Topology and a Possible Biological Implication». / N. Rashevsky //Bulletin of mathematical biophysics. – 1956. – Volume 17, – pp. 111-126.
8. Trucco E. «On the information content of graphs: compound symbols; different states for each point» / E. Trucco // Bulletin of mathematical biophysics. – 1956. – Vol. 16. – P. 237-258.
9. Гуревич И.М. Информация – всеобщее свойство материи. Характеристики. Оценки. Ограничения. Следствия / И.М. Гуревич, А.Д. Урсул. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». – 2012. – 312 с.
10. Гуревич И.М., Евстигнеев М.П., Пучков М.А. Автоматизация оценки объёма информации в структурах молекул и молекулах / И.М. Гуревич, М.П. Евстигнеев, М.А. Пучков. // Материалы междунар. научно-технич. конф. «Актуальные вопросы биологической физики и химии БФФХ-2012». Севастополь, 2012. – С. 93-95.
11. Гуревич И.М. Оценка объёма информации в соединениях цепей ДНК / И.М. Гуревич // Материалы междунар. научно-технич. конф. «Актуальные вопросы биологической физики и химии БФФХ-2012». Севастополь, 2011. – С. 90-92.

УДК 681.3: 004-52

А.Н. Абраменков, ст. инж.-программист,
Н.В. Петухова, ст.научн. сотрудник,
М.П. Фархадов, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г.Москва, Россия
aabramenkov@asmon.ru, nvpet@ipu.ru, mais@ipu.ru

РЕЧЕВОЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ДОСТУПА К ОБЪЕКТАМ ЭЛЕКТРОННОЙ КАРТЫ ГОРОДА

Целью работы является обеспечение оператору возможности указывать на электронной карте (ЭК) города нужный объект путем произнесения названия объекта в микрофон в ходе короткого интерактивного человеко-машинного диалога с системой управления речью.

Структурная схема системы управления речью

Система управления речью включает в себя:

- базовое программное обеспечение распознавания речи;
- речевые блоки для распознавания улиц и других объектов ЭК города;
- фонетические словари для улиц и объектов карты;
- аудио файлы для озвучивания названий улиц и объектов, реплик, подсказок и сообщений системы;
- прикладное программное обеспечение для управления диалогом;
- программное обеспечение для преобразование текста в речь (при необходимости);
- интерфейсы с устройством ввода речи (микрофон) и с программным обеспечением заказчика;
- программное обеспечение протоколирования диалогов.

На рис. 1 представлена архитектура системы речевого доступа к объектам ЭК.

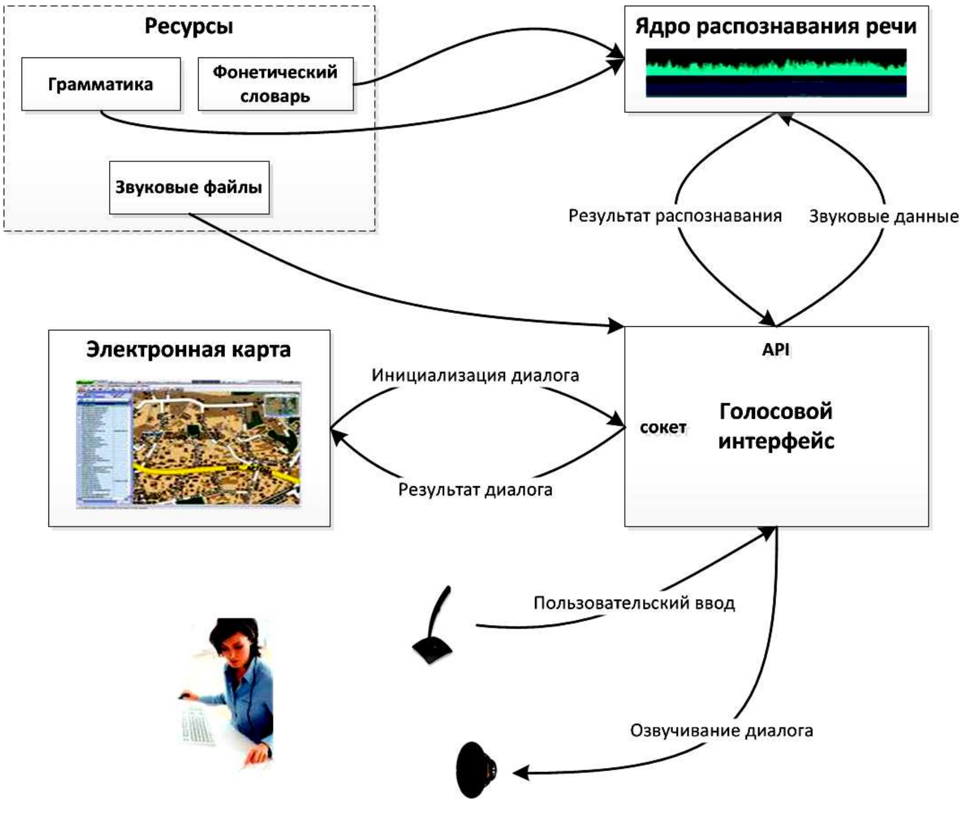


Рисунок 1 – Архитектура системы речевого доступа к объектам электронной карты.

Данная архитектурная модель была использована для создания речевого интерфейса к ЭК Москвы, где применяется русскоязычный распознаватель.

Обращение к объектам ЭК оператор осуществляет голосом через микрофон или гарнитуру с помощью проводной или беспроводной связи. В ходе короткого диалога формируется в текстовой форме адрес нужного объекта. Поддерживается возможность уточнения деталей местонахождения искомого объекта. Результат диалога транслируется в модуль динамического управления объектом карты.

Основные функции системы управления речью

Система управления речью устойчиво работает в режиме 24x7x365 и выполняет следующие основные функции:

- взаимодействие с оператором в соответствии с согласованным сценарием;
- преобразование произносимых оператором названий объектов из согласованного множества в текстовую форму;
- озвучивание распознанного названия объекта;
- вывод реплик и подсказок в соответствии с согласованным сценарием;
- протоколирование диалогов.

Система речевого доступа на азербайджанском языке к объектам электронной карты

Далее рассматривается реализация системы доступа к объектам ЭК с использованием компьютерного распознавания слов и фраз азербайджанского языка. Для создания речевого интерфейса на азербайджанском языке использован базовый языковый пакет другого языка, фонетически близкого к азербайджанскому. Разработан сценарий диалога, составлен словарь фонетических транскрипций, создана грамматика, выполнена интеграция с системой управления ЭК города для комплексной системы безопасности.

Разработка базовой системы распознавания для любого языка является весьма трудоемким и дорогостоящим делом. Создание распознавателя на базе скрытых марковских моделей схематично состоит из следующих этапов [1-6]:

- Изучение особенностей языка, классификация фонем, выбор единиц распознавания речи, выбор типа модели для базовых единиц речи.
- Создание фонетического словаря, который должен включать такие слова и их сочетания, чтобы наиболее полно отражать фонемы и их сочетания, присутствующие в языке.
- Создание на базе фонетического словаря речевой базы данных (речевого корпуса) для обучения и тестирования. Слова и словосочетания из фонетического словаря многократно произносятся разными дикторами в разных условиях и с использованием различных микрофонов и телефонных аппаратов. Записи размечаются, атрибутируются, снабжаются фонетической транскрипцией. Часть записей речевого корпуса (обычно большая) используется для обучения моделей, другая часть – для тестирования.
- Производится спектральный анализ и параметризация речевых сигналов из обучающего множества записей речевой базы с целью получения эталонных векторов признаков и обучения акустических моделей, описывающих элементы речи.
- Составляются СММ для всех элементов речи и всех слов из словаря. Выбираются начальные параметры СММ. Производится обучение моделей, для чего последовательно выполняется переоценка параметров СММ, и модели с новыми параметрами тестируются на тестовой выборке до тех пор, пока не будет достигнут желаемый результат.

Высокая трудоемкость работ по созданию распознавателей приводит к тому, что к настоящему времени созданы распознаватели только для наиболее распространенных в мире языков и диалектов. Распознавателей для азербайджанского языка нет в их числе. В связи с этим при разработке проекта речевого доступа к объектам карты была использована идея использования для распознавания азербайджанской речи фонетических и лингвистических модели для распознавания другого, близкого по звучанию, языка.

Описание разработки

Для создания речевого доступа к ЭК города Баку был выбран базовый пакет для распознавания турецкого языка. Выбор диктовался тем, что оба языка, турецкий и азербайджанский, принадлежат к тюркской группе, имеют много общего в произношении большинства звуков и слов, их алфавиты отличаются лишь одной буквой.

Были произведены эксперименты с использованием турецкого языкового пакета распознавателя речи Nuance Recognizer 9 [7]. Для этой цели были выбраны названия 100 объектов, содержащихся на ЭК Баку, и составлена соответствующая грамматика. В турецком языке отсутствует буква Ə азербайджанского алфавита, поэтому при написании грамматик она была заменена на букву e. Затем был программно сгенерирован словарь автотранскрипций по внутренним правилам фонетического транскрибирования для турецкого языка. Анализ словаря автотранскрипций показал, что большинство слов получило фонетическое описание, адекватно отражающее их звучание на азербайджанском языке. Однако для 16 слов из 100 транскрипции пришлось изменить. Например, турецкое слово heyder произносится на турецком языке как hEdEr, т.е. буква y опускается при произношении, но то же слово heyder на азербайджанском языке звучит как hEjdEr, т.е. буква y должна быть отражена в фонетической транскрипции.

В табл. 1 приведен список слов, для которых были сделаны исправления в фонетических транскрипциях, и указаны сами эти исправления.

Таблица 1 – Список исправленных транскрипций
для азербайджанских названий улиц Баку

Слово в словаре	Автотранскрипция	Исправленная транскрипция	Буква	Транскрибирование	
				ошибочное	правильное
heyder	hEdEr	hEjdEr	y		j
azadlıq	azadlIk	azadl1g	ı	I	1
mustafa	mUsdafa	mUstafa	t	d	t
babek	babEk	ba:bEk	a	a	a:
tbilisi	tbIlIsI	tIbIli:sI	i	I	i:
neftçiler	nEftdZIlEr	nEftSIlEr	ç	dZ	S
bağ	Ba	bag	ğ		g
geray	gEra	gEraj	y		j
vurğun	vUrUn	vUrgUn	ğ		g
semed	sEmEd	samEt sEmEt	d	d	t
reşid	rESId	rESIt	d	d	t
behbudov	bEhbUdQv	pEhbUtQv	d	d	t
seferli	sEfErlI	safErlI	e	E	a
eliağa	ElIaa	ElIjaga	ğ		g
dairesi	darEsI	da:jrEsI	a i	a	a: j
ukrayna	Ukrajna	Ukra:jna	a	a	a:

После внесения изменений в фонетические транскрипции доля правильно распознанных слов составила 0,94. Этот результат подтвердил возможность и целесообразность применения турецкого языкового пакета для распознавания азербайджанской речи.

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма работы системы. Разработка была применена в системе управления безопасностью города Баку.

Заключение. Речевой интерфейс к электронной карте города облегчает оператору работу и повышает эффективность оперативного наблюдения за ситуациями с целью обеспечения безопасности города и быстрого реагирования на чрезвычайные ситуации. Создание речевого интерфейса к системе безопасности обеспечивает дополнительный канал доступа к объектам карты и способствует повышению улучшению условий труда диспетчеров.

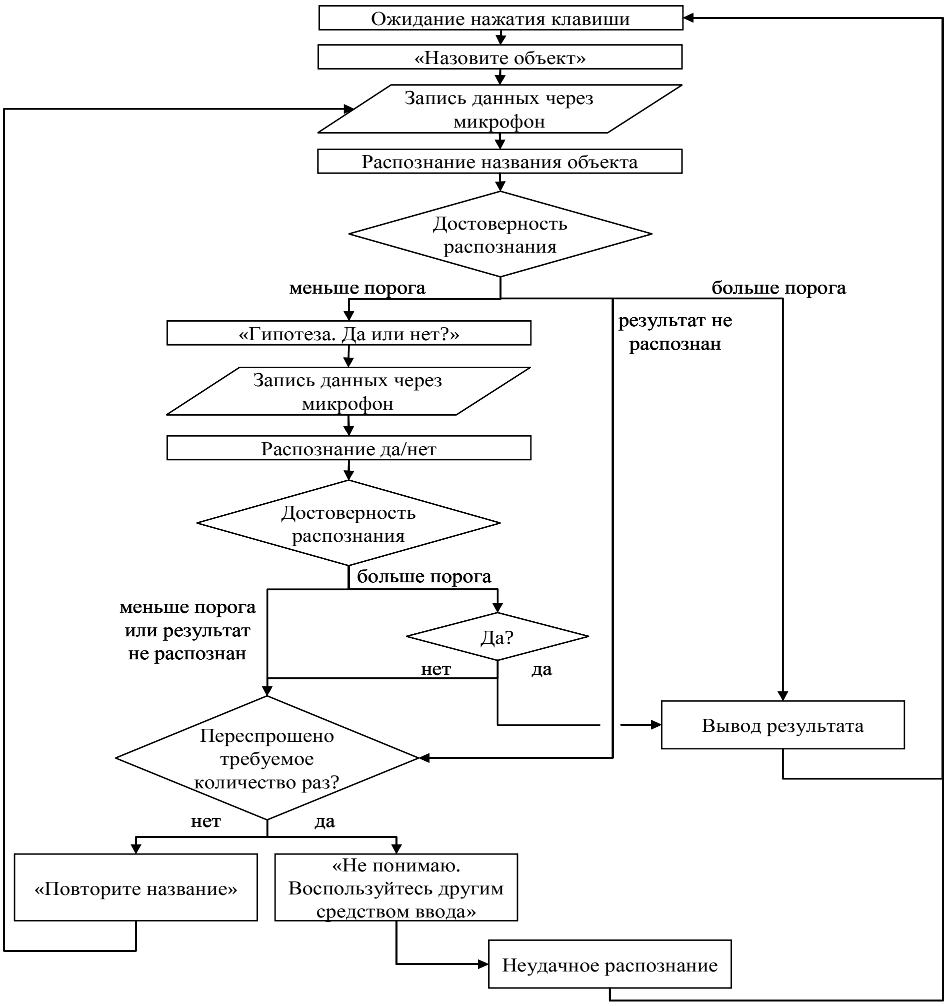


Рисунок 2 – Блок-схема работы системы речевого доступа к объектам электронной карты.

Библиографический список использованных источников

1. Baum L.E. A maximization technique occurring in the statistical analysis of probabilistic functions of Markov chains / L.E. Baum, T. Petrie, G. Soules and N. Weiss // Ann. Math. Stat. – 1970. – 41(1). – P. 164-171.

2. Jelinek F. Design of a linguistic statistical decoder for the recognition of continuous speech / F. Jelinek, L.R. Bahl and R.L. Mercer // IEEE Trans. Information Theory, – 1975. – IT-21. – P. 250-256.

3. L.R. Rabiner. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition / L.R. Rabiner // Proc. IEEE. – February 1989. – 77 (2). P. – 257-286.

4. Rabiner L.R. Fundamentals of speech recognition, / L.R. Rabiner, B.H. Juang // A Pearson Education Company Upper Saddle River, NJ. L. by AT&T. – 1993 – 507 p.

5. Q. Hong. A training method for hidden Markov model with maximum model distance and algorithm / Q. Hong, S. Kwong // in Proc. of the Neural Networks and Signal, Proseccing. – April 2004. – Vol. 1. – P.465-468.

6. M. Gales and S. Yuang. The Application of Hidden Markov Models in Speech Recognition. / M. Gales and S. Yuang // Foundation and Trends in Signal Perosessing. – 2007. – Vol. 1, № 3 – P. 195-304.

7. Dragon speech recognition software. http://www.nuance.com/dragon/index.htm. 2012.

Наукове видання

"Сучасні проблеми
прикладної математики
інформатики і автоматизації"

Матеріали міжнародного науково-технічного семінару
(Севастополь, 23-26 вересня 2012 р.)

Відповідальний за видання
А.П. Фалалеєв, проректор з наукової роботи,
доц., канд. техн. наук

Технічний редактор Л.А. Кареліна
Нормо контролер І.О. Черевкова
Комп'ютерне складання
та верстання І.М. Гуревіч

Формат 89×124/16 Ум. друк. арк. 33,9
Тираж 150 пр. Зам. №35

Видавець, виготовлювач – Севастопольський національний технічний університет (СевНТУ)
Адреса: вул.. університетська, 33, м. Севастополь, Україна, 99053
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи, серія ДК №1272 від 17.03.2003