

## САМООРГАНИЗАЦИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. Ч.2.

Добрынин Владимир Николаевич<sup>1</sup>, Ульянов Сергей Викторович<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Кандидат технических наук, профессор Института системного анализа и управления;  
ГБОУ ВПО Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: arbatsolo@yandex.ru.

<sup>2</sup>Доктор физико-математических наук, профессор;  
ГБОУ ВПО Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

Социотехнические системы (СТС) относятся к новому классу динамических открытых само-развивающихся систем. Проблема разработки и проектирования интеллектуальных систем управления развитием социотехнических систем (СТС) является новой для современной теории управления и синергетики. Решение данной проблемы особенно актуально на современном этапе глобального экономического кризиса и неразрывно связано с решением сложной задачи принятия ответственных решений в условиях кризиса, техногенных катастроф, информационного риска или непредвиденных (нештатных) ситуаций. В статье рассмотрены принципы построения и анализа моделей интеллектуального управления СТС для решения указанных задач.

**Ключевые слова:** социотехнические системы, самоорганизация, управление, интеллектуальное управление, управление развитием.

## SELF-ORGANIZATION AND INTELLIGENT CONTROL OF SOCIOTECHNICAL SYSTEM'S DEVELOPMENT. PT. 2.

Dobrynin Vladimir<sup>1</sup>, Ulyanov Sergey<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Candidate of Science in Engineering, professor of Institute of system analysis and management;  
Dubna International University of Nature, Society, and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: arbatsolo@yandex.ru.

<sup>2</sup>Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;  
Dubna International University of Nature, Society and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

Sociotechnical systems (STS) are the part of a recent class of dynamic self-developing open systems. The recent issue in modern control theory and synergetics is development and design of intelligent control systems for sociotechnical systems. The solution of this issue is topical on the current stage of global economic crisis and inseparably linked with complex issue of making important decisions in crisis, anthropogenic catastrophes, informational risk or unforeseen situations. The article reviews the principles of making and analysing STS intellectual control models for resolving the stated issues.

**Keywords:** Sociotechnical systems, self-organization, control, intelligent control, control of development

## Характеристики развивающихся СТС

Философия и инженерия развивающихся систем, в том числе и социотехнических систем (СТС) рассматривает по-разному процесс развития. Так философия рассматривает СТС как особую форму движения, характеризуемую тремя философскими категориями: количество, качество, структура.

Определение *количества* как наличного числового множества элементов, составных частей целого дано еще Аристотелем: «Количеством называется то, что может быть разделено на составные части, каждая из которых, будет ли их две или несколько, является чем-то одним, данным налицо. То или иное количество есть множество, если его можно счесть; это величина, если его можно измерить».

*Качество* характеризует целостную нерасчлененную определенность предметов и явлений. Всякий предмет обладает бесчисленными свойствами. Мы воспринимаем и познаем лишь ничтожную часть этих свойств. Между тем всякий предмет всегда предстает перед нами как нечто целое, нерасчлененное, в виде звезды, камня, дома, дерева, завода, фабрики и т. д.

*Структура* – это категория, характеризующая распределение и взаимодействие в пространстве элементов, предметов и явлений, программу их развития. Главная особенность структуры – целостность, качественное отличие от составляющих ее элементов. Структура теснейшим образом связана с качеством.

Изменение качества предметов во всех случаях связано с перестройкой структуры составляющих их элементов.

*Развитие* может рассматриваться как совокупное изменение во взаимосвязи количественных, качественных и структурных категорий в системе.

Остановимся более подробно на этих изменениях.

*Количественные изменения* – это увеличение или уменьшение составных частей данного целого, выражаемое увеличениями или уменьшениями их числовых значений, приводящими на определенных этапах своего изменения к качественному скачку.

*Структурные изменения* – это изменения взаимоотношения составных частей, которые совсем не обязательно должны сопровождаться увеличением или уменьшением их числа.

Напротив, число составных частей может оставаться неизменным. Между тем структурные изменения также могут приводить к качественному скачку. Поэтому можно считать, что как количественные, так и структурные изменения играют причинную роль в качественных изменениях. Но согласно диалектике движущей силой всяких изменений в СТС являются противоречия. Там, где нет внутренних или внешних противоречий, там не может быть изменений. Что касается количественных изменений, то они обусловлены, прежде всего, противоречиями, существующими у рассматриваемой системы с окружающей ее средой. В структурных же изменениях главную роль играют внутренние противоречия между элементами системы. Хотя следует отметить, что и внешние противоречия не абсолютно безразличны для структурных изменений, но их роль здесь не так велика. Среди главных противоречий современного развития СТС в условиях научно-технического прогресса следует выделить два процесса: интеграцию и дифференциацию производства. Единство и борьба этих двух противоположных процессов порождают в обществе многообразие различных технико-экономических, политических и социально-экономических структур.

Остановимся подробнее на механизмах качественных изменений СТС.

Будучи материальными процессами, качественные преобразования СТС, так или иначе, связаны с количественными характеристиками материи и энергии, т.е. производимой продукции и затрат человеческого труда. Можно представить себе следующие виды качественных изменений системы:

1. Прежде всего, количественные и качественные показатели функционирования могут изменять свое качество за счет количественного прибавления материи и энергии в результате взаимодействия с внешней средой. При этом количественные изменения материи и энергии лишь тогда изменяют качество, когда они воздействуют непосредственно на структуру СТС. Например, в экономике можно установить зависимость структуры корпоративных систем от численности

рабочей силы и величины основных фондов. При определенном соотношении их уровня социотехническая система становится необозримой и происходит распад структуры.

2. Качественные изменения в системе могут происходить также в результате перераспределения (без нарушения баланса) энергии и материи внутри самой системы. В замкнутых системах имеется тенденция к максимизации некоторой целевой функции, которую можно рассматривать как аналог физической энтропии. Все это ведет в конечном итоге к новому качеству системы.
3. Качественные изменения системы могут быть результатом изменения качества подсистем (элементов), составляющих структуру системы. В СТС при изменении вида подсистем (например, автоматизации и компьютеризации процессов их функционирования) могут появляться новые качества.

Теперь остановимся на общих свойствах законов развития систем.

Под законом развития в СТС мы будем понимать определенный способ выражения устойчивости функциональных связей и отношений между структурными компонентами СТС, а также устойчивости структуры (организации) самих этих предметов и явлений. Иными словами, закон выражает собой не только порядок внутренней перестройки СТС в процессе их развития, но и способ их существования, характер их внутренней организации. Законы можно разделить на две большие категории: законы строения и функционирования; и законы динамического развития.

В первом случае это законы, характеризующие внутреннюю связь компонентов системы и условия сохранения целостности материальной структуры объекта её относительной устойчивости в процессе непрерывных изменений.

Во втором случае это законы, характеризующие определенную последовательность, ритм, темп и т. д. перестройки самих функциональных структур СТС.

Эта классификация законов и определяет два типа наук, изучающих подобные явления:

1. Науки, занимающиеся изучением законов взаиморасположения и взаимодействия одновременно существующих объектов (законы старения и функционирования).
2. Науки, изучающие смены одних объектов другими или одних состояний объектов другими состояниями.

Ускорение процесса развития связано с тем, что материальные структуры системных объектов как бы заключают в себе в снятом виде пройденную историю и ее законы. С другой стороны, процесс развития характеризуется тенденцией к появлению однотипных материальных образований и процессов и, соответственно, законов (тенденция к «стандартизации» состава и функций социальных, технологических и экономических отношений и постепенным «выпадением» их нетипичных, препятствующих развитию образований). Эти тенденции обуславливают и проявление в поведении системных объектов общих закономерностей, характерных для различных форм развития и изучаемых различными науками (термодинамика, кибернетика, экономика, социология). Отсюда и возможность их моделирования вследствие изоморфизма их структур.

Если законы функционирования воздействуют на ход развития не непосредственно, а опосредованно, в той мере, в которой они влияют на объединяющие элементы структуры, то преобразование внутренней структуры обусловлено не обычной, а особой экстремальной подвижностью элементов. Она достигается в том случае, когда изменение условий внешней среды приводит не просто к изменению состояния системы, а к такой ее перестройке, которая существенно изменяет ее внутреннюю структуру. Законы развития как бы подчиняют себе законы действия. Законы функционирования не способны сами по себе объяснить процесс развития, они лишь раскрывают способ движения, его механизм.

Лишь переход от изучения законов функционирования одной СТС к множеству (ансамблю) подобных СТС, различающихся по своей структуре и характеру функционирования, дает возможность подойти к пониманию процессов их развития. Обобщающее понимание «развития» содержится в синергетической концепции самоорганизации. Суть этой концепции состоит в следующем: 1) развитие – это процесс иерархической самоорганизации; 2) в процессе развития происходит взаимодействие двух процессов – устойчивого (стационарного) и неустойчивого (флуктуационного); 3) взаимодействие устойчивого и неустойчивого процессов наблюдаются в открытых системах (неравновесные системы с диссипацией) и в потоковых системах (приток и отток энергии, информации, знаний,

вещества); 4) развитие является естественным процессом, поскольку его направленность не является результатом полного целенаправленного управления; 5) поведение в больших и сложных системах характеризуют не столько внешними силами, сколько внутренним состоянием системы, использующей энергию, вещество, информацию и знания из внешней среды.

Приведём примеры.

К СТС можно отнести такие социально-технические комплексы как гидроэлектростанция (ГЭС) и социальная структура (СС), обеспечивающая функционирование ГЭС и жизнь коллектива в определённой социальной обстановке. Качество жизни населения, одна часть которой обслуживает ГЭС, а другая - социальную инфраструктуру, отражает в целом уровень жизни. Стабильность и управляемость технической компоненты (ГЭС) характеризует качество технической компоненты.

Уровень развития обобщенной системы «ГЭС + СС» может служить общим показателем СТС. Согласованность между технической и социальной компонентами СТС может рассматриваться как общий технологический показатель эффективности системы в целом.

Аналогично, в этом же ключе, можно рассматривать различные СТС, ориентированные на производство общественно значимого продукта.

Различие между ними может быть в технологических акцентах, связанных с природой используемого исходного материала и природой конечного продукта. Так, ГЭС является преобразователем энергии падающей воды в механическую и затем в электрическую. Тем самым технологии использования технической составляющей (как техническая компонента), а также профессиональная компетенция коллектива и особенности жизни населения (как СС) имеют свои отличительные качества по сравнению с другими СТС.

Горно-обогатительные и перерабатывающие комплексы совместно с СС представляют собой СТС, обладающей теми же общими свойствами, что и ГЭС.

Но условия жизни населения и технологии производства и особенности окружающей среды отличаются от других систем, в том числе и от ГЭС.

В качестве еще одного примера СТС можно рассмотреть железнодорожный транспорт (ЖДТ) и связанную с ним СС. Техническая компонента данной СТС включает всю инфраструктуру, подвижной состав, средства сигнализации и телеуправления, а также мониторинговые системы. В качестве важной особенности можно отметить неоднородность технической компоненты: различные допустимые нагрузки на инфраструктуру, различные виды энергоносителей для локомотивов, различные типы средств связи, различный уровень автоматизации, и т.д.

В СС данной СТС можно выделить следующие типовые части: службы, отвечающие за содержание ЖДТ в рабочем и безопасном состоянии; службы, отвечающие за качество и безопасность производственных процессов; службы, отвечающие за развитие как технической, так и социальной компонент; вспомогательные службы. Если рассматривать данную СТС в границах государства, то к ее СС так же можно отнести соответствующие вузы и НИИ, занимающиеся подготовкой кадров, разработкой новых составляющих технической компоненты и улучшением технологии использования ЖДТ.

## ***Особенности управления эффективным развитием СТС***

Из многих актуальных задач направлений исследования СТС в данной статье выделены следующие проблемы.

*Первая* – разработка системного взгляда на особенности развития СТС, при котором она рассматривается как самоорганизующаяся адаптивная открытая система, периодически проходящая через две стадии. Обе стадии повторяются на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ): 1) устойчивая стадия – управляемости и робастности; 2) стадия хаоса – флуктуационная, когда система может либо деградировать, либо перейти в новое качественное состояние устойчивости, управляемости и самоорганизации.

Проблемы, связанные с удержанием системы на траектории развития, являются предметом ее изучения.

*Вторая* – структурное представление компонент СТС через существенные свойства, которые являются основой её качественных особенностей. Проблема наличия синергетических эффектов (синергетизма) в СТС – главное содержание этой проблемы.

*Третья* – подходы к построению формальной модели СТС и качественное исследование некоторых частных случаев моделей СТС, не противоречащие динамике-развития СТС. Проблема формализации СТС составляет основу данной темы.

*Четвертая* – интеллектуальное робастное управление развитием СТС на основе структурно-функционального подхода.

В [1, 6] рассмотрен конструктивный механизм разработки интеллектуального управления СТС с применением мягких вычислений, основой которого стали:

- динамическая модель СТС, представленная в виде нелинейной системы дифференциальных уравнений;
- обобщённый показатель эффективности управления развитием на основе информационно-термодинамического критерия.

В [1, 6] предложено:

1. В СТС должна присутствовать компонента предсказания, отслеживающая и систематизирующая (на всех стадиях жизненного цикла – ЖЦ) накапливаемые негативные внутренние и внешние факторы. На основе этих факторов определяются следующие свойства: возможная точка бифуркации (в пространстве и времени) перехода во флуктуационную стадию; наличие возможного класса стратегий управления переходом в новую фазу устойчивости; необходимые ресурсы (возможные потери полезного ресурса) на переход в новое качественное состояние СТС и т.д.
2. Для обеспечения эффективного функционирования этой компоненты предлагаются средства имитационного моделирования с применением интеллектуальных (мягких и квантовых) вычислений. Результатом моделирования являются эффективные управляющие воздействия на СТС как на объект управления (ОУ).

Общие принципы и представления о социотехнических системах.

Особенность СТС состоит в её способности к самоорганизации и самоадаптации. При этом, сами понятия развития, самоорганизации и самоадаптации требуют дополнительного определения и уточнения в зависимости от конкретной модели СТС как объекта управления и условий среды его функционирования. Жизненный цикл СТС состоит из повторяющихся периодов. Каждый период включает две фазы: устойчивое (стационарное) и неустойчивое (флуктуационное). В процессе нахождения в устойчивом состоянии в системе накапливаются факторы бифуркации, которые, вне зависимости от противодействия, приводят систему в неустойчивое состояние. Выход из неустойчивого состояния возможен по двум направлениям: первое – система деградирует; второе – система переходит в качественно новое устойчивое состояние. С точки зрения теории систем управления удержание системы в устойчивом состоянии – задача первого контура управления; вывод системы из неустойчивого состояния – задача второго контура управления. Поскольку выход из неустойчивого состояния может привести систему в новое качественное устойчивое состояние, то этот общий процесс, охватывающий два уровня управления, назван «управление развитием».

## ***Информационно-резонансный и синергетический эффекты в СТС***

Важным фактором развития СТС является согласованность ритмик функционирования систем. Часто высказывается гипотеза о том, что эффективность развития может достигаться в условиях резонанса взаимодействия СТС с окружающей средой и между компонентами (подсистемами) СТС. В условиях близких к резонансу возникает эффект – малыми усилиями обеспечивается поддержка системы в состоянии устойчивости и управляемости.

Синергетический эффект в СТС наблюдается при коллективном обмене информацией и кооперации в СС или извлечении скрытых в классических состояниях технической системы (ТС) новых знаний. В этом случае могут быть спроектированы условия формирования интеллектуального управ-

ления искусственной самоорганизации за счет проектирования новых видов (квантовой или смешанной) корреляции между подсистемами СТС.

Обсудим данный эффект на примере квантовой самоорганизации формирования робастных баз знаний (БЗ) в интеллектуальных системах управления СТС в непредвиденных ситуациях управления.

Под алгоритмическим процессом самоорганизации робастных БЗ понимается процесс проектирования в реальном времени робастных сигналов адаптивного управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств ТС. Процесс проектирования осуществляется в условиях неопределенности новой исходной информации об изменении цели управления, в условиях информационного риска или непредвиденных ситуаций управления.

Исполнительные устройства с помощью квантового нечеткого вывода (КНВ) формируют управляющую силу на ОУ на основе реакции продукционных правил ранее спроектированных (на ограниченное количество заданных ситуаций управления) робастных БЗ (например, нечетких ПИД-регуляторов). При этом сами ранее спроектированные БЗ могут терять свойство робастности при новой ошибке управления, в которой содержится информация о новой непредвиденной ситуации управления.

Процесс самоорганизации БЗ реализуется в реальном времени. В основе самоорганизации лежит синергетический эффект: обнаружение и извлечение (в процессе обработки алгоритмом КНВ) дополнительной квантовой информации, скрытой в классических состояниях процесса управления. Сам синергетический эффект возникает за счет корреляций между информационно взаимодействующими частными БЗ и осуществляется формирование дополнительного количества информации, которое отсутствует во взаимодействующих БЗ. При этом осуществляется редукция избыточной информации, содержащейся в классических состояниях процесса управления, что позволяет проектировать необходимый уровень робастности БЗ.

Таким образом, рассматриваемый синергетический эффект квантовой самоорганизации знаний при формировании робастных БЗ осуществляется в информационном пространстве состояний системы управления в отличие от физического пространства при самоорганизации диссипативных физических структур<sup>1</sup>.

Данный факт имеет принципиальное значение при разработке процессов проектирования робастных интеллектуальных систем управления (ИСУ).

Поясним данное положение примерами описания качественных свойств классических мер информации Шеннона, таких как отрицательное значение и синергетизм взаимной информации (synergistic mutual information – синергетическая взаимная информация), скрытых в заданных мерах информации и формируемых за счет корреляционных свойств взаимодействующих подсистем<sup>2, 3, 4</sup>.

Отметим основные определения, сведения и факты из теории классической и квантовой теорий информации, которые используются в данной статье.

Меры информационной энтропии, относительной энтропии и взаимной информации в классической теории информации<sup>5, 6</sup>. Допустим, что для дискретной случайной величины  $X$  заданы функция плотности распределения вероятностей  $p_X(x)$ , условные функции плотности распределения вероятностей  $p_{Y|X}(y|x)$ ,  $p_{X|Y}(x|y)$ , и совместная функция плотности распределения вероятностей  $p_{X,Y}(x,y)$ .

<sup>1</sup>Nicolis G., Prigogine I. Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations. – N.Y.: J. Wiley, 1977.

<sup>2</sup>Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В., Хазен Э.М. Информационно-семантические проблемы в процессах управления и организации. – М.: Наука, 1977.

<sup>3</sup>Williams P.L., Beer R.D. Nonnegative decomposition of multivariate information // arXiv:1004.2515v1, 2010.

<sup>4</sup>Griffith V. Quantifying synergistic information remains an unsolved problem // arXiv:1112.1680v2, 2011.

<sup>5</sup>Yeung R.W. Information theory and network coding. – N.Y.: Springer, 2008.

<sup>6</sup>Стратонович Р.Л. Теория информации. – М.: Советское Радио, 1975.

*Определение 1* Мера энтропии  $H(X)$  определяется в виде  $H(X) = -\sum_x p(x) \log p(x)$ . Энтропия является мерой измерения потенциальной неопределенности, содержащейся в случайной величине  $X$  и имеет следующие свойства:

- $H(X) \geq 0$ , т.е., энтропия неотрицательная величина на пространстве определения случайной величины и  $H(X) = 0$ , если и только если  $X$  величина детерминированная;
- Так как  $H_b(X) = \log_b(a) H_a(X)$ , то нет необходимости переопределять базис логарифма.
- Величина  $H(X) = -\log p(x)$  называется собственной информацией случайной величины.

*Определение 2* Мера объединенной энтропии определяется как:

$$H(X, Y) \triangleq -E_{p(x, y)} [\log p(x, y)] = -\sum_{x \in \mathcal{X}} \sum_{y \in \mathcal{Y}} p(x, y) \log p(x, y).$$

*Определение 3* Для заданной случайной величины  $X$ , мера условной энтропии  $Y$  (усредненной по  $X$ ) определяется как:

$$\begin{aligned} H(Y|X) &\triangleq -E_{p(x)} [H(Y|X=x)] = -\sum_{x \in \mathcal{X}} p(x) H(Y|X=x) = \\ &= -E_{p(x)} E_{p(y|x)} [\log p(Y|X)] = -E_{p(x, y)} [\log p(Y|X)]. \end{aligned}$$

Отметим, что в общем случае  $H(X|Y) \neq H(Y|X)$ .

*Правило цепи* Совместная и условная энтропии имеют естественную природу вычислений:

- *Теорема* (цепочное правило):  $H(X, Y) = H(X) + H(Y|X)$ .
- *Следствие*:  $H(X, Y|Z) = H(X|Z) + H(Y|X, Z)$ .
- Условная энтропия определяет энтропию одной из случайных величин с условным знанием о другой величине.

*Относительная энтропия и взаимная информация* Мера редукции неопределенности называется *взаимной информацией*  $I(X; Y) = H(X) - H(X|Y)$ .

*Теорема*: Соотношения между взаимной информацией и энтропией имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} I(X; Y) &= H(X) - H(X|Y) \\ I(X; Y) &= H(Y) - H(Y|X) \\ I(X; Y) &= H(X) + H(Y) - H(X, Y) \\ I(X; Y) &= I(Y; X) \text{ (симметрия)} \\ I(X; Y) &= H(X) \text{ (собственная информация)} \end{aligned}$$

Диаграмма Вена, представленная на рис. 1 геометрически иллюстрирует соотношения между указанными мерами энтропии и количества информации.

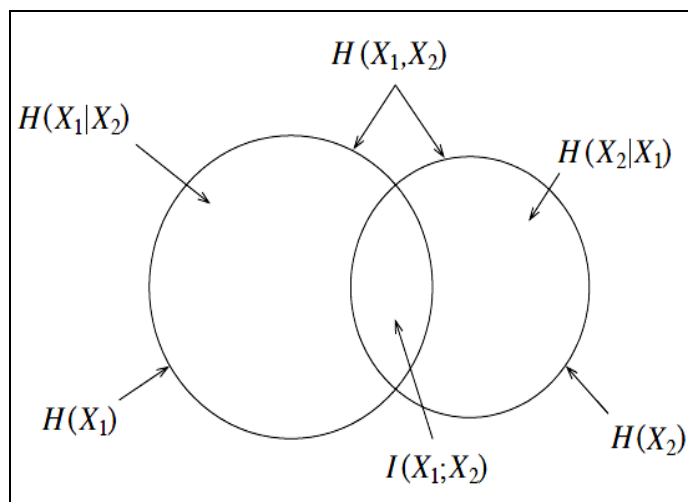


Рис. 1. Диаграмма Вена взаимоотношений между мерами энтропии и количества информации для двух случайных величин  $X_1$  и  $X_2$

Рассмотрим важный пример нового синергетического свойства мер информации Шеннона.

Пример 1: *Отрицательное значение взаимной информации* Допустим, что  $X_1$  и  $X_2$  две независимые случайные бинарные величины с вероятностями:

$$\Pr(X_i = 0) = \Pr(X_i = 1) = 0.5, \quad i = 1, 2.$$

Допустим, что:

$$X_3 = (X_1 + X_2) \bmod 2. \quad (1)$$

Нетрудно проверить, что  $X_3$  имеет одинаковую функцию плотности распределения вероятностей, что  $X_1$  и  $X_2$ . Тогда имеем, что энтропии данных величин также равны, т.е.:

$$H(X_i) = -0.5 \log 0.5 - (1 - 0.5) \log(1 - 0.5) = 1, \quad i = 1, 2, 3.$$

Отметим, что  $X_1, X_2$  и  $X_3$  попарно независимые случайные величины. Меры энтропии рассматриваются с основанием логарифма 2. Поэтому взаимная энтропия  $H(X_i, X_j) = 2$ , а взаимное количество информации  $I(X_i, X_j) = 0$  для  $1 \leq i < j \leq 3$ . Из (1) следует также, что каждая случайная величина является функцией двух других случайных величин. Тогда по правилу цепочки для энтропии, имеем:

$$H(X_1, X_2, X_3) = H(X_1, X_2) + H(X_3 | X_1, X_2) = 2 + 0 = 2.$$

Теперь для  $1 \leq i < j \leq 3$ , имеем:

$$I(X_i; X_j | X_k) = H(X_i, X_k) + H(X_j, X_k) - H(X_1, X_2, X_3) - H(X_k) = 2 + 2 - 2 - 1 = 1.$$

Здесь использовано известное соотношение из теории информации:

$$\begin{aligned} I(X; Y | Z) &= H(X | Z) - H(X | Y, Z) = H(X, Z) - H(Z) - [H(X, Y, Z) - H(Y, Z)] = \\ &= H(X, Z) + H(Y, Z) - H(X, Y, Z) - H(Z), \end{aligned}$$

тогда

$$I(X_1; X_2; X_3) = I(X_1; X_2) - I(X_1; X_2 | X_3) = 0 - 1 = -1. \quad (2)$$



В данном примере имеем  $I(X_1; X_2; X_3) < 0$ , что означает  $I(X_1; X_2 | X_3) > I(X_1; X_2)$ .

Диаграмма Вена на рис. 2 характеризует представленную ситуацию.

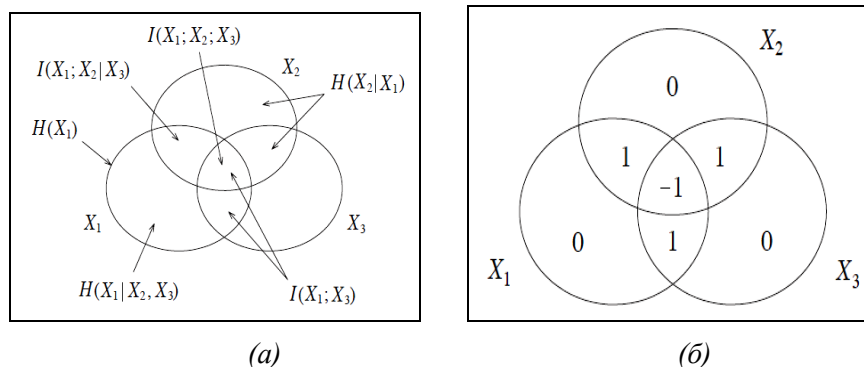


Рис. 2. Диаграмма Вена взаимоотношений между мерами энтропии и количества информации для двух случайных величин  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$

Следовательно, в отличие от свойств мер энтропии Шеннона, количество взаимной условной информации Шеннона между двумя случайными величинами может возрастать при добавлении условной третьей случайной величины. Более того, в (2) правая часть выражений не симметрична относительно символов  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , в то время как левая часть является симметричной величиной. Таким образом имеем *синергетический* эффект возрастания взаимной условной информации за счет формирования симметрии из несимметричных величин и отрицательного значения взаимной информации.

Пример 2: *Синергетизм информации*. Рассмотрим логическую схему обработки информации на основе логического элемента «Исключающее ИЛИ - XOR», представленную на рис. 3.

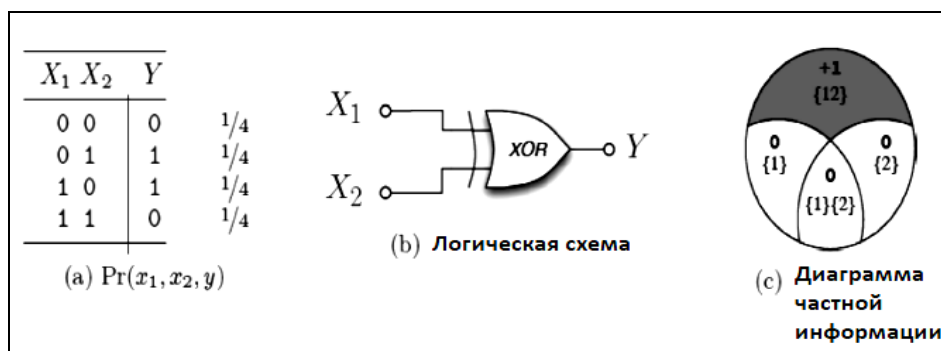


Рис. 3. Пример логической схемы «Исключающее ИЛИ - XOR»

В этом случае коалиция  $X_1 X_2$  полностью определяет величину  $Y$ , т.е.  $I(Y : X_1 X_2) = H(Y) = 1$  бит, но для  $X_1$  и  $X_2$  взаимная информация относительно  $Y$  имеем:

$$I(Y : X_1) = I(Y : X_2) = 0 \text{ бит}.$$

Таким образом, множество  $\{X_1, X_2\}$  определяет синергетическую информацию в количестве 1 бита относительно  $Y$ . При этом сами подсистемы  $\{X_1, X_2\}$  содержат нулевое количество информации  $Y$ . Аналогичный синергетический эффект имеет место в квантовом случае, который применяется в квантовом нечетком выводе.

Квантовый нечеткий вывод (КНВ), разработанный ранее на основе четырех фактов из квантовой теории информации, является частным случаем разработанного алгоритма самоорганизации [12]. На

структурном уровне организации ИСУ осуществляется объединение спроектированных ранее конечного числа БЗ совместно с моделью КНВ в один блок квантового НР. Это объединение дает возможность формировать в реальном времени робастное управление из реакций продукционных правил указанных БЗ на непредвиденную ситуацию управления.

При этом достаточно использовать только минимальную информацию об изменении ситуации управления, содержащейся в новой ошибке управления.

Таким образом, с помощью алгоритма управления самоорганизацией БЗ осуществляется извлечение скрытой дополнительной квантовой информации из классической информации, содержащейся в реакции классических состояний сигналов управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств, спроектированных ранее для конечного числа ситуаций обучения. При этом осуществляется редукция избыточной информации в классических состояниях сигналов управления.

Результатом работы алгоритма управления самоорганизацией БЗ является проектирование (в реальном времени) робастного сигнала управления параметрами соответствующих исполнительных устройств, формирующих управляющую силу на ОУ в условиях непредвиденных ситуаций управления.

Во избежание недоразумений в интерпретации процесса самоорганизации, отметим также, что физически по определению «самосборка» и «самоорганизация» являются разными понятиями. Процесс «самосборка» отличается от «самоорганизации» отсутствием в общем виде в процессе «самосборка» предварительного выбора типа корреляции между невзаимосвязанными элементами («строительными блоками») и процесс самосборки осуществляется за счет локальных взаимодействий и внешних (в общем случае случайных) воздействий. Управление выбором (типа и вида) квантовой корреляции между «строительными блоками» в процессе «самосборка» определяет вид синергетической кооперации в формируемой за счет самоорганизации структуре.

Поэтому введение управления выбором корреляции позволяет учитывать в формируемых структурах синергетику целенаправленных кооперативных эффектов из ограниченного числа «строительных блоков» и составляет основу процесса самоорганизации.

Решение данной задачи непосредственно связано со следующей (трудной и принципиально важной для теории и систем управления) проблемой: *определение роли и влияния аналогов квантовых эффектов на повышение уровня робастности проектируемых ИСУ.*

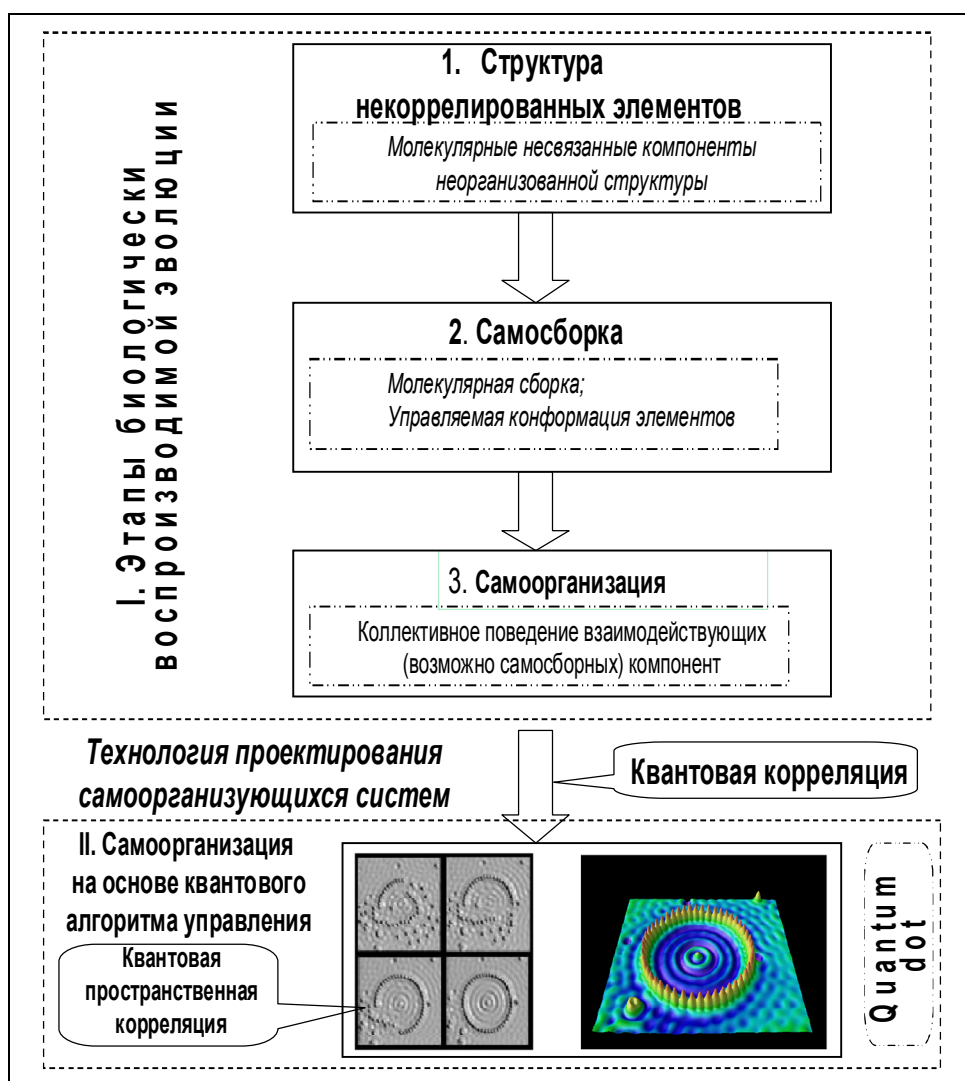
Данная проблема решается проектированием робастных ИСУ на основе КА самоорганизации БЗ в непредвиденных ситуациях управления и информационного риска.

## ***Биологически воспроизводимый алгоритм самоорганизации***

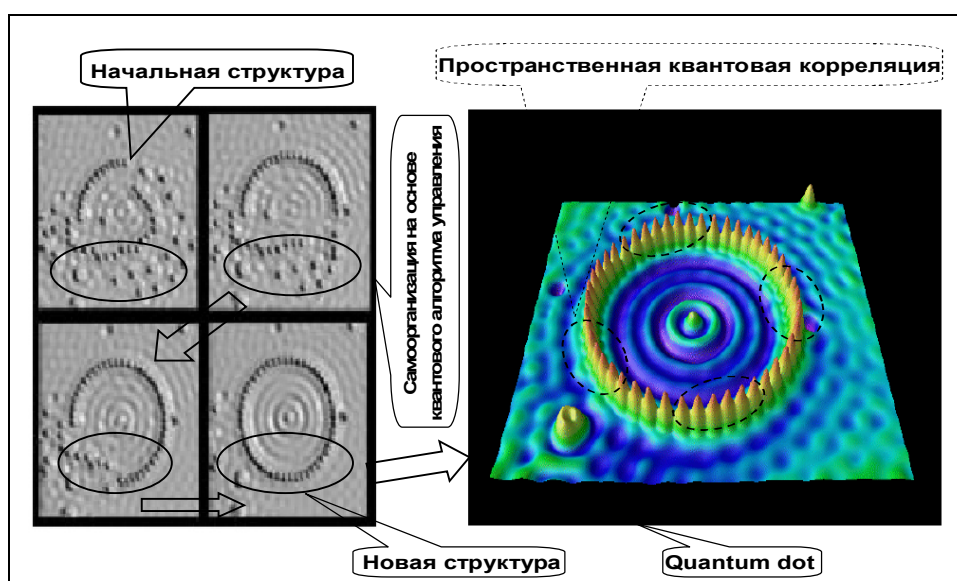
Отметим общие характеристики самого процесса самоорганизации в природных системах. Наличие свойства самоорганизации в природных и биологически воспроизводимых системах объясняется рядом факторов. Первым фактом наличия толерантности является избыточность или свойство распределения самоорганизации между выделенными «защищенными» зонами эволюции структуры системы, в которых выполняется свойство самоорганизации. Вторым фактором наличия внутренней робастности является её проявление за счет рандомизации, флуктуаций или шумов. Третьим фактором является проявление стабилизирующих эффектов гибких структур в контурах обратных связей.

Рассмотрим общие характеристики (биологически воспроизводимой в естественной природе) процессов самоорганизации. Данные характеристики составляют основу инженерии проектирования. Также учитываются при разработке в структурах ИСУ модели квантового алгоритма управления самоорганизацией робастных БЗ.

Рисунок 4 иллюстрирует структуру биологически воспроизводимого алгоритма самоорганизации на основе анализа макро- и микро- моделей самоорганизации.



(a)



(б)

Рис. 4. Структура биологически воспроизводимого алгоритма самоорганизации  
(a) – блок-схема КА самоорганизации; (б) – пример пространственно-временной квантовой корреляции при самоорганизации квантовой точечной структуры

*Примечание.* При дальнейшем изложении материала в данной статье во избежание недоразумений в интерпретации процесса самоорганизации, представленного на рис. 4, отметим также, что по определению «самосборка» и «самоорганизация» являются разными физическими понятиями. Процесс «самосборка» отличается от «самоорганизации» отсутствием в общем виде в процессе «самосборка» предварительного выбора типа корреляции между невзаимосвязанными элементами («строительными блоками») и процесс осуществляется за счет локальных взаимодействий и внешних (в общем случае случайных) воздействий. Управление выбором (типа и вида) квантовой корреляции между «строительными блоками» в процессе «самосборка» определяет вид синергетической кооперации в формируемой за счет самоорганизации структуры. Поэтому введение управления выбором корреляции позволяет учитывать в формируемых структурах синергетику целенаправленных кооперативных эффектов из ограниченного числа «строительных блоков» и составляет основу процесса самоорганизации.

Для анализа в качестве примеров были выбраны следующие информативно представительные модели из многоуровневой иерархической структуры процессов самоорганизации: 1) самоорганизация поведения толпы людей в тоннеле (см. пример выше); 2) самоорганизация (людей, колонии муравьев и т.п.) в экстремальных условиях (типа паники при пожаре и т.п.); 3) самоорганизация движения автомобилей на скоростных трассах; 4) самоорганизация на микроуровне (колонии муравьев при поиске пищи, интеллектуальные активные агенты с обменом информацией, инженерия самоорганизации колоний бактерий); 5) квантовая кооперация насекомых, квантовая самоорганизация наноструктур (квантовые кораллы) за счет передачи информации на микроуровне и изменения типа квантовой корреляции.

Отметим общие качественные особенности моделей процессов самоорганизации.

Процесс самоорганизации в общем виде включает четыре составляющих механизма:

1. позитивная обратная связь;
2. отрицательная обратная связь;
3. сбалансированное соотношение между используемым и потенциальным ресурсами эволюции (информационно-термодинамического) поведения динамической системы;
4. многократное (физическое и информационное) взаимодействие между компонентами.
5. Природная (биологически воспроизводимая) эволюция достижения самоорганизации динамической системы основана на следующих этапах (см. рис. 4):
6. формирование (задание) множества невзаимосвязанных элементов «строительных блоков» (templating) исходной структуры;
7. самосборка (self-assembling) новой структуры;
8. самоорганизация (self-organization) робастной структуры.

При этом, как отмечалось выше, «самосборка» в общем виде отличается от «самоорганизации» отсутствием в процессе «самосборка» предварительного выбора типа и вида корреляции между невзаимосвязанными элементами, а сам процесс осуществляется за счет локальных взаимодействий и внешних (в общем случае случайных) воздействий.

Данные этапы отражены на рис. 4,а.

Рисунок 4,б демонстрирует наличие реальной квантовой самоорганизации в квантовой точечной структуре (quantum dot) за счет наличия пространственно-временной корреляции, содержащейся изначально (закодированной) в структуре «строительных блоков». Данный экспериментальный факт является физической основой для построения математической модели самоорганизации.

Таким образом, искомое свойство робастности ИСУ генетически закодировано в алгоритме воспроизводства процесса самоорганизации. Поэтому система может автономно справиться с непредвиденным событием, используя различные (но близкие по идее) подходы:

- *Адаптация* (обучение, эволюция). Система изменяет свое поведение, чтобы справиться с изменением событий.

- *Упреждение* (когнитивность). Система способна предсказать изменения и может изменить свое поведение. Это свойство является специальным случаем адаптации, которое не требует от системы оценки ситуации до ее возникновения.
- *Робастность*. Система является робастной, если способна функционировать при возникновении непредвиденных возмущений. Данное свойство достигается с помощью модулярности, вырождения, распределенной робастности, или наличием избыточности.

Надежное функционирование самоорганизующихся систем достигается за счет использования комбинации указанных подходов и формирования интеграции свойств в изменяющихся и непредвиденных событиях.

### **Пример интеллектуального управления СТС ЖДТ на основе мягких вычислений**

Сложность применения традиционных методов теории управления в задачах эффективного управления слабо структурированными СТС, функционирующих в условиях нештатных ситуаций и информационного риска, привело к необходимости применения методов технологии мягких вычислений. В данном разделе рассмотрены примеры применения технологии мягких вычислений в управлении типовыми структурами СТС на примере железнодорожного транспорта (ЖДТ), реально функционирующего в условиях непредвиденных ситуаций управления и информационного риска.

*Интеллектуальное управление ЖДТ и проблема нештатных ситуаций СТС.* Обсудим предварительно некоторые общие понятия, присущие ЖДТ как классу СТС. *Предприятие как технологический процесс, преобразующий* исходное сырьё в общественно значимый продукт, эффективно при синхронности и согласованности многих внешних и внутренних условий. Если рассматривать предприятие как систему, в которой циркулируют материальные потоки, информационные, знаниевые потоки и потоки данных, то очевидно, что согласованность и релевантность этих потоков в пространстве и времени определяют эффективность производства в целом. Комплексные АСУ предприятия являются средством поддержки информационного (в широком смысле) пространства предприятия. ЖДТ как один из видов транспортных систем представляется предприятием, которое осуществляет перенос в пространстве и времени материальных объектов (грузов). Для переноса массы грузов из пунктов отправления в пункты назначения необходима внешняя и внутренняя энергия системы, затрачиваемая на перемещение грузов и сохранения при этом свойств груза.

Таким образом, ЖДТ можно рассматривать как предприятие преобразующее энергию в перемещение грузов в пространстве и времени (рис. 5).

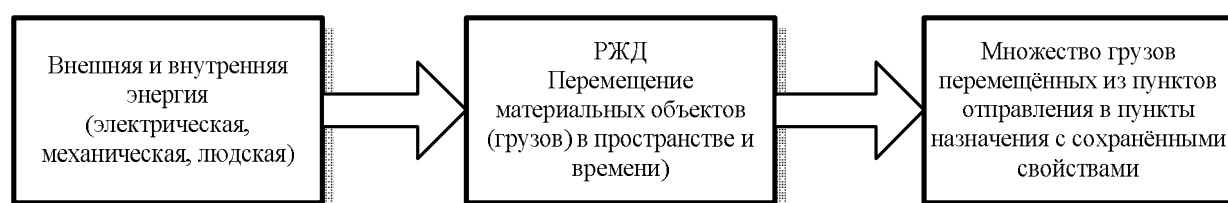


Рис. 5. Предприятия ЖДТ как технология массопереноса

Такая точка зрения позволяет рассмотреть проблему эффективности ЖДТ с позиции согласованности циркулирующих в ней потоков.

С системных позиций ЖДТ представляется как СТС (социальная среда + технологии) и тем самым, ЖЦ ЖДТ характеризуется двумя основными фазами: фазой устойчивости и фазой неустойчивости. Самоорганизация является основным механизмом выхода ЖДТ из неустойчивого состояния в качественно новое устойчивое состояние. Устойчивость, управляемость и робастность ЖДТ функционально связано с согласованностью и релеванностью, циркулирующих внешних и внутренних потоков. С другой стороны РЖД можно рассматривать как сложную многоуровневую СТС. Наличие многоуровневой системы подразумевает упорядоченную организацию контуров управления и развития ЖДТ. Комплексные проблемы, сопутствующие системе ЖДТ на всех стадиях ЖЦ и являющиеся,

как правило, точками бифуркации ставят систему в критическое состояние: либо потери приобретённых качеств (деградация), либо переход на новое качественное состояние (развитие).

Часто осуществляется проецирование комплексных проблем на различные срезы (страты) (экономические, технологические, организационные, информационные и т.д.). Данные страты являются источниками неэффективных решений (не согласованность, преждевременность, запаздывание, несинхронность и т.д.). Поэтому декомпозиция комплексной проблемы на частные и решение частных проблем требует системного подхода и соответствующих системных методов решения. Рассмотрение ЖДТ как СТС является исходной позицией для решения комплексных системных задач.

**А. Особенности СТС ЖДТ.** Техническая компонента ЖДТ как СТС включает всю инфраструктуру (путевое развитие, строения и сооружения, средства электропитания, средства сигнализации и телемеханики), подвижной состав (вагоны и локомотивы), различные АСУ ТП и нематериальные активы (нормативные и технологические документы). В качестве важной особенности можно отметить неоднородность технической компоненты: различные допустимые нагрузки на инфраструктуру, различные виды энергоносителей для локомотивов, различные типы средств связи, различный уровень автоматизации. В социальной структуре данной СТС можно выделить на следующие типовые части: службы, отвечающие за содержание ЖДТ в рабочем и безопасном состоянии; службы, отвечающие за качество и безопасность производственных процессов; службы, отвечающие за развитие как технической компоненты, так и социальной; административные и вспомогательные службы. Если рассматривать данную СТС в границах государства, то к ее СС так же можно отнести соответствующие вузы и НИИ, занимающиеся подготовкой кадров, разработкой новых составляющих технической компоненты и улучшением технологии использования ЖДТ.

**Б. Управление движением.** ЖДТ – транспортная система; следовательно, ее основное назначение – преобразование энергии в перенос масс. Управление этим процессом – движением – и есть основная задача управления данной СТС в стадии стабильности. Движение делится на три типа перевозок: пассажирские, пригородные и грузовые. Как бизнес-процессы эти типы можно рассматривать отдельно. Во-первых, они оцениваются в различных показателях эффективности, откуда проистекают особенности в управлении, свойственные каждому типу; во-вторых, для каждого типа используются свои ресурсы: вагоны для всех трех типов используются разные, пути (а иногда и целые станции) также специализированы, локомотивы – тоже; соответственно, необходима различная квалификация машинистов и т.д. Единственное, что связывает все типы перевозок – межстанционная инфраструктура, диспетчерский персонал и график движения поездов.

График движения поездов – нормативный документ, являющийся технологической основой взаимодействия всех служб ЖДТ по управлению движением. График определяет процесс движения поездов, отображая его в декартовой системе координат. Период графика – 24 часа. При построении графика поезда и отдельные пункты (станции) считаются материальными точками, а движение поездов равномерным. Отображение движения одного поезда называется ниткой.

Нормативный график разрабатывается один раз в год с учетом прогнозных пассажиро- и грузопотоков, тяговых свойств локомотивов, нормативов, обеспечивающих безопасность движения поездов, и норм продолжительности работы локомотивных бригад.

Пример графика приведен на рис. 6.

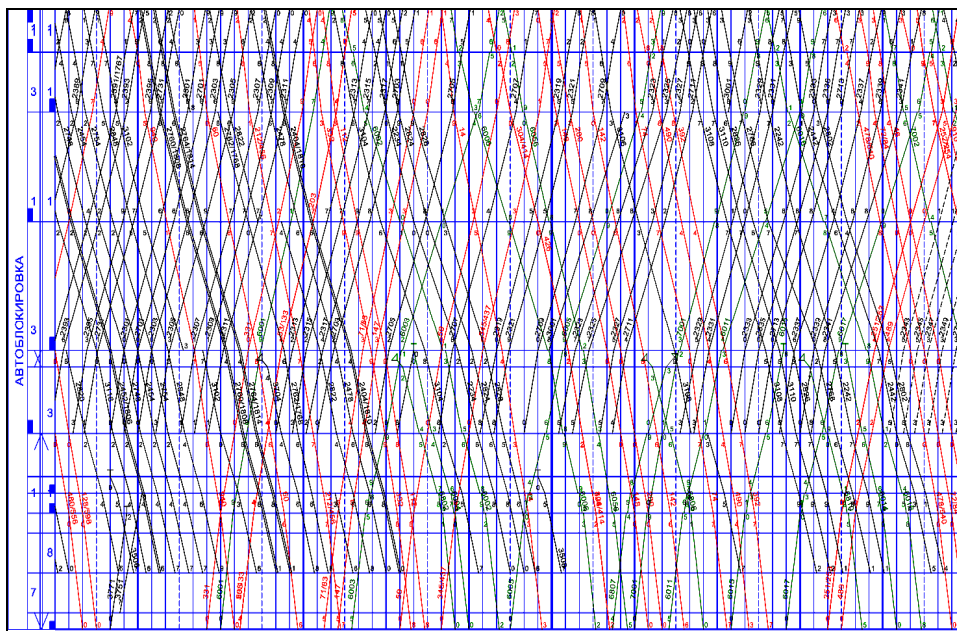


Рис. 6. Пример графика планирования

На графике красным цветом обозначены нитки пассажирских поездов, зеленым – пригородных, черным – грузовых.

Итак, для того чтобы управлять пассажирскими перевозками, требуется:

- спрогнозировать пассажиропотоки в течение года;
- на их основе построить график движения поездов;
- в оперативном режиме выполнять график движения поездов.

Для пассажирского движения выполнение графика сводится к предоставлению необходимого подвижного состава и локомотивной бригады к заранее известному моменту отправления поезда. Окончательный вариант плана утверждается диспетчером направления и спускается на линейных уровень в виде наряд-заказов. В дальнейшем система активного контроля в режиме реального времени ведет мониторинг хода выполнения плана и в случае обнаружения отклонений подает сигнал диспетчеру направления и системе поддержки принятия решений для выдачи рациональных корректировок.

Укрупненная структура ИСУ ЖДТ с указанной системой планирования показана на рис. 7.

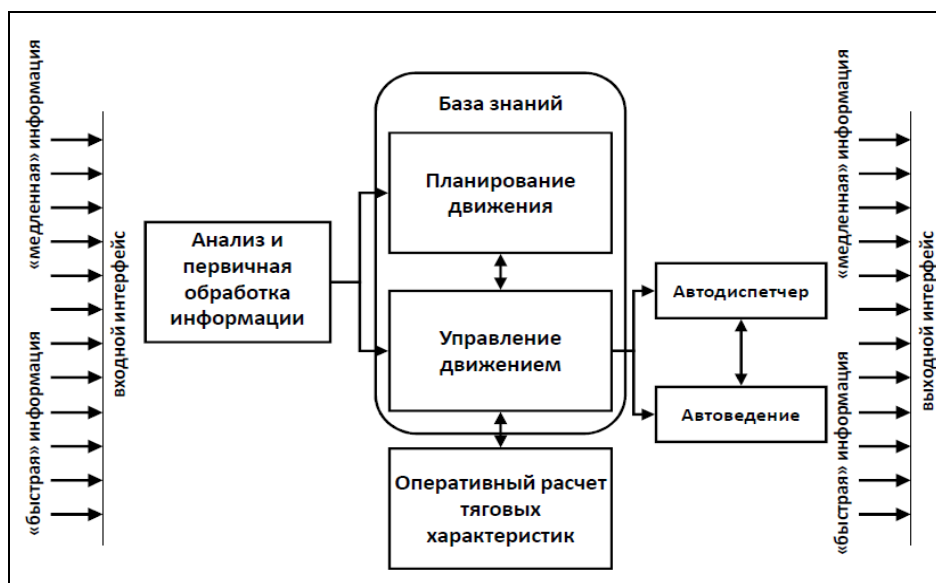


Рис. 7. Структура ИСУ ЖДТ

Такой подход к управлению грузовым движением позволит снять довольно большую часть оперативных решений с диспетчерского аппарата, фактически оставляя на нем только функции соблюдения графика и управления в нестандартных ситуациях. Процесс движения на ЖДТ становится полностью управляемым, а с ним и управление ЖДТ как СТС в стадии стабильности.

В случае возникновения нестандартных ситуаций, влекущих за собой выбивание одного или нескольких поездов из графика, диспетчер должен ввести поезда в график в соответствии с их приоритетностью. Поэтому разработка ИСУ соответствует стратегии развития ЖДТ по переходу от информационных систем к управляющим. ИСУ планирования разрабатывается как модульная, масштабируемая система. Разработанные алгоритмы унифицированы и могут быть применены к различным полигонам в существующем виде и при необходимости адаптированы требованиям конкретного полигона.

**В. Виды неопределенности в СТС.** Неопределенность в управляющей подсистеме СТС, также как и в ТС, в значительной степени порождается неточностью и недостоверностью получаемой информации. Эта неточность зарождается при проектировании системы, при определении целей и подцелей, при выборе критериев оценки, т.е. в тех задачах, где есть альтернативный выбор. Сложность компенсации таких неопределенностей состоит в том, что все они взаимосвязаны и оказывают косвенное воздействие на каждый параметр управления.

Существует несколько определений критических ситуаций, приведенных в научно-технической литературе. Указывается, что «в процессе функционирования системы управления в результате отказов, ошибок, внешних возмущений возникают критические ситуации (КС), в которых необходимо принятие своевременных мер для предотвращения опасных последствий». Понятие «критическая ситуация» многообразно, поэтому рассмотрим несколько определений критических ситуаций, охватывающих различные точки зрения на процесс управления сложными системами.

*Определение 1.* С точки зрения безопасности функционирования ОУ критическая ситуация – это такая ситуация, которая возникает в процессе функционирования сложного объекта и при возникновении которой, если не принять и не реализовать соответствующие решения своевременно, может произойти переход в неуправляемую аварийную ситуацию.

*Определение 2.* С функциональной точки зрения критическая ситуация – это такая ситуация, при которой невозможно реализовать некоторые функции системы, что может привести к потере жизненно важных свойств системы (работоспособности, способности к управлению, планированию, адаптации, контролю, самозащите, самовосстановлению и т.д.).

*Определение 3.* С точки зрения управления критическая ситуация определяется как невозможность реализации функции управления сложным объектом с удовлетворительным качеством, которое позволило бы приблизиться к желаемой цели. Степень близости к цели определяется в каждом конкретном случае на основе определенных критериев эффективности управления.

*Определение 4.* С информационной точки зрения критическая ситуация – это такая ситуация, при которой невозможно своевременно получить необходимую достоверную информацию о состоянии системы, цели и/или поведении внешней среды для принятия эффективного управленческого решения, что может привести к аварийной ситуации или катастрофе.

*Определение 5.* С точки зрения оператора (лица, принимающего решения) критическая ситуация – это такая ситуация, при которой отсутствуют возможности реализации той или иной функции и/или ранее принятых решений (из-за отсутствия ресурсов, в том числе временных, из-за большой психологической нагрузки, потери цели из-за стресса, из-за агрессивного поведения внешней среды), что может привести к аварии или катастрофе.

Обобщая приведенные определения, можно сделать вывод, что критические ситуации возникают вследствие неблагоприятного влияния внешней среды, отказов аппаратно-программного обеспечения, ошибок персонала, приводящих к нарушению ограничений, установленных для характеристик процесса функционирования объекта. В случае непринятия своевременных и правильных управляющих решений критическая ситуация может перейти в аварийную ситуацию или катастрофу, имеющие последствия в виде угрозы здоровью и жизни людей, а также в виде значительного материального ущерба. Следовательно, повышение эффективности принимаемых решений в условиях неопределенности информации о критических ситуациях, дефицита времени является ответственным моментом в обеспечении безопасности функционирования сложных объектов.



Макропроцесс принятия решений в критической ситуации включает следующие этапы:

- обнаружение КС;
- сбор и анализ информации о КС;
- распознавание КС;
- определение целей управления ситуацией при решении проблемы;
- разработку критериев оценки эффективности решений;
- генерацию перечня возможных решений;
- прогнозирование последствий управляющих решений;
- оценку вариантов решений; планирование действий по ликвидации критической ситуации;
- реализацию управляющих воздействий и контроль их эффективности.

В обобщенном виде стадии развития КС показаны на рис. 8

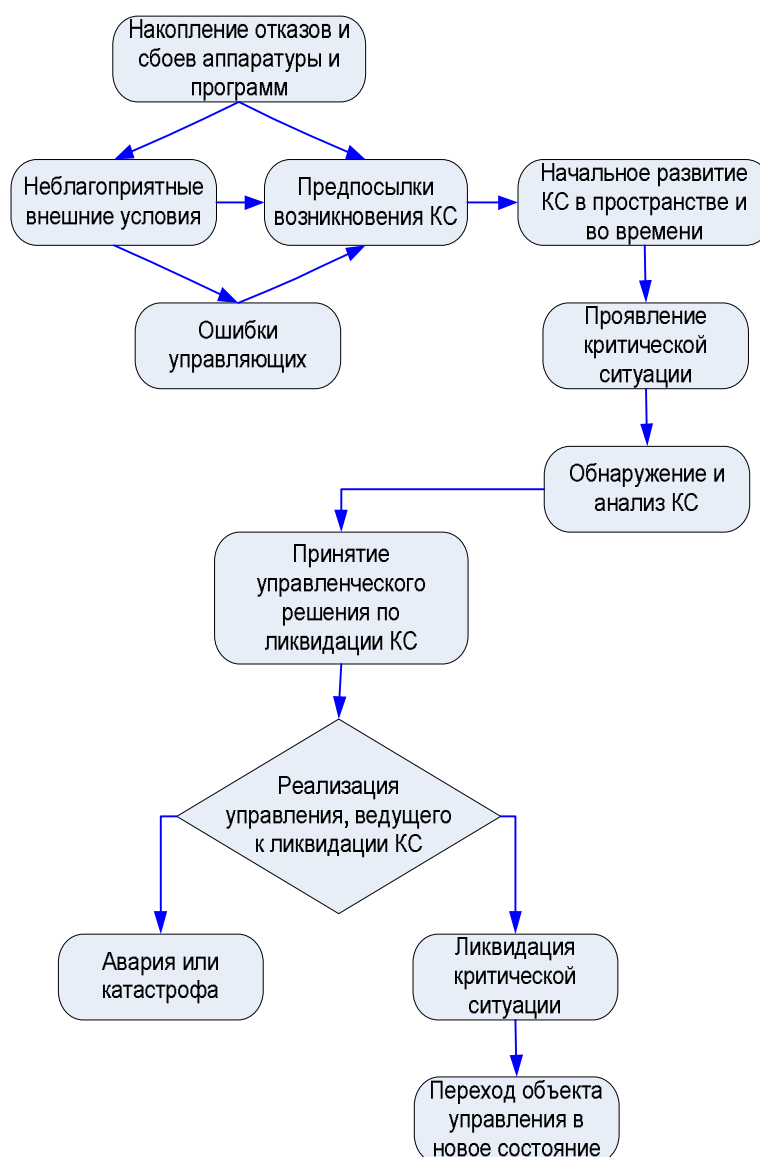


Рис. 8. Стадии развития критической ситуации

При сходстве многих характеристик процессов управления в критических ситуациях рассматриваемые классы объектов (динамические (летательные аппараты) и распределенные сетевые (вычислительные сети, энергосистемы, экосистемы)) имеют специфические особенности управления, например, различный резерв времени для принятия решений в критических ситуациях. По времени

протекания критические ситуации классифицируются как быстро протекающие и медленно протекающие (развивающиеся). Установить продолжительность стадий.

Проблемы управления СТС обусловлены как общими свойствами динамических систем, так и ее специфическими свойствами.

Первая особенность управления СТС состоит в необходимости учета неопределенности, множественности и противоречивости целей системы и ее подсистем. Как управляемая система, СТС объединяет в своем составе не только множество функциональных подсистем (производство, материальное обеспечение, планирование, учет и контроль, и т.п.), но и множество самостоятельных на своем уровне структурных подразделений, каждое из которых функционирует как для достижения общесистемных целей, так и для исполнения своих собственных целей.

Для СТС характерна субъективность критериев управления, т.е. зависимость выбора или формирования критерия от лица, принимающего решения. При функционировании системы выбор критерия оптимальности может изменяться со временем, зависит от уровня развития системы, определяется руководителем, исходя из полученных инструкций, уровня своего профессионализма и даже своего характера, складывающихся обстоятельств. Оптимальное управление в социальных и экономических системах реализуется только в рамках выбранных критериев, и, следовательно, «оптимальное» решение в смысле какого-либо критерия необязательно наилучшее для всей системы. В то же время выбор критерия в сложившейся ситуации в определенный период с учетом прогнозирования развития системы является очень важным и эффективным способом экономического управления.

Вторая особенность управления СТС состоит в том, что множество параметров, переменных состояния, внешних воздействий и регулируемых координат в сочетании с большим числом управляющих воздействий порождает огромное количество структур и алгоритмов управления. Поэтому проблемы построения управляемой СТС разрешимы с использованием системного, функционального и структурного подходов и связаны с решением множества задач выбора:

- целей, подцелей, критериев эффективности управления и согласования их между собой;
- способов использования и описания информации о состоянии объекта и окружающей среды, необходимой для формирования управляющих алгоритмов;
- регулируемых координат и управляющих воздействий, необходимых для достижения целей;
- определения информации для формирования каждого управляющего воздействия, его формы, величины и знака.

Третья особенность управления СТС состоит в том, что ее функционирование происходит в условиях неопределенностей. Неполнота и нечеткость описания являются важной особенностью СТС. Она является следствием того, что протекающие процессы являются плохо формализуемыми, и неопределенность (нечеткость) лежит в самой их природе.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что особенности управления СТС, функционирующей в условиях неопределенности, состоят в том, что:

- в системе одновременно изменяется несколько взаимосвязанных параметров;
- большинство решений также взаимосвязаны и неоднозначно влияют на динамику процессов и величину целевых показателей;
- процесс управления является многошаговым и содержание каждого шага не может быть заранее однозначно определено, что приводит к необходимости строить дерево ситуаций и анализировать его на каждом шаге принятия решений;
- не все параметры системы управления могут быть выражены в виде количественных соотношений, т.е. среди данных имеются лингвистические понятия;
- трудно идентифицировать ситуации, т. к. состояния самой системы и внешней среды характеризуются множеством значимых переменных;
- объект (СТС) эволюционирует во времени, меняются его структура и функции, что приводит к эволюции процесса управления;
- люди как элементы, входящие в структуру управляемой СТС, имеют активную природу: их поведение и интеллектуальные способности, направленные на достижение собственных целей, в некоторых случаях могут не соответствовать целям системы управления.

Практика показала, что при помощи классических методов, базирующихся на использовании точных математических моделей, невозможно обеспечить адекватное описание алгоритмов управления и обеспечить эффективные стратегии управления СТС. Развивающиеся в настоящее время методы и модели искусственного интеллекта представляются перспективными для решения задач управления СТС.

Многообразие сочетаний «ситуация – решение – величина параметра» и сложность прогнозирования последствий некоторых решений требуют разработки ИСУ, способной обеспечить анализ логической взаимосвязи ситуаций и принимаемых решений.

Нечеткие алгоритмы, допускающие использование нечетких инструкций, широко распространенных в различных сферах человеческой деятельности, позволяют описывать приближенные рассуждения и, следовательно, являются полезным инструментом для приближенного анализа таких систем и процессов поддержки решений, которые слишком сложны для применения общепринятых количественных методов.

ИСУ, основанные на теории нечетких множеств, дают возможность реализовывать процесс принятия решений по управлению СТС на базе фактически измеренной информации, знаний экспертов и стратегии логического вывода. Они позволяют моделировать перечисленные особенности СТС и оперировать плохо формализованными данными и лингвистическими описаниями.

Последствия деятельности человека-оператора (влияние человеческого фактора) на современном этапе приходится учитывать не только в традиционных «человеко-машинных» системах, но и в сложных системных социотехнических комплексах, где воедино увязаны технологический процесс с человеко-машинными отношениями, природная экосистема и социокультурная среда, в рамках которой осуществляется реализация новой технологии.

Примером таких систем являются транспортные системы (ЖДТ), функционирующие в условиях усложнения эксплуатации парка вагонов и локомотивов (увеличение скорости движения поездов, расстояния их безостановочного следования, осевых нагрузок и т. п.), повышением требований к эксплуатационной надежности подвижного состава, стремлением обеспечить высокий уровень безопасности движения поездов.

Проблема социально-технического взаимодействия в современном обществе состоит в том, что высокий уровень развития техники, как продукта человеческой деятельности, не подкреплён столь же высокой степенью развития общества, самого человека в их взаимодействии с техническими системами. Нерациональное поведение и деструктивная деятельность человека (как человеческий фактор), включенного в контур управления подобной глобальной системы, может вызвать непредсказуемые последствия в различных частях системы, а в известных условиях вызвать и катастрофическую перестройку всего целого. Своевременное управление и правильное разрешение проблемных ситуаций обеспечивает эффективность системы, а в некоторых ситуациях предотвращает аварийные или иные нежелательные последствия за счет выявления и устранения предостерегающих рискованных ситуаций.

Решение задач планирования и управления такими ситуациями, как правило, осуществляется в условиях недостатка достоверной информации, как об активном поведении окружающей среды, так и о располагаемых полезных ресурсах для достижения поставленной цели в условиях противодействия этой среды. Отсутствие необходимой информации о происходящих в системе изменениях не позволяет качественно решать задачи контроля, идентификации и диагностики текущего состояния системы и ее элементов. В качестве источников возникновения неопределенностей выступают дефицит информационных, энергетических, материальных и других видов ресурсов, непредсказуемость поведения внешней среды, непредвиденные изменения в структуре и поведении самой системы.

В этих условиях является весьма проблематичным сформировать своевременное (и в то же время эффективное) управляющее воздействие на ОУ. При обнаружении сигналов, описывающих поведение ОУ, важен не только факт их наличия, но и величина необходимых информативных параметров, несущих данные об опасности, которая содержится в таких сигналах. Управляющее воздействие, формируемое при наличии сигнала, определяется степенью близости оценки и истинного значения параметра. Ошибки при этом могут порождаться как некорректностью идентификации сигнала, так и неточностью его оценивания.

В качестве примера интеллектуального управления СТС с учетом информационного риска рассмотрим задачу управления информационными рисками и безопасности движения ЖДТ, столь акту-

альную на современном этапе развития транспортных перевозок в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций.

*Интеллектуальное управление рисками и безопасность движения ЖДТ в условиях риска и нештатных ситуаций.* Одним из приоритетных направлений инновационного развития железнодорожной отрасли становятся разработка и широкое применение интеллектуальных железнодорожных систем. Они создаются для снижения информационного риска и повышения безопасности движения, для эффективности перевозочного процесса, совершенствования защиты объектов от несанкционированного вмешательства и вандализма, уменьшения отрицательного влияния «человеческого фактора» на качество управления, особенно в экстремальных ситуациях. Наличие факторов неопределенности в инфраструктуре ЖДТ, с одной стороны, несоблюдение технических регламентов безопасности и возникновение нештатных ситуаций на ЖДТ, с другой стороны, приводят к необходимости рассмотрения проблемы управления информационными рисками и повышения безопасности ЖДТ.

Попытка увеличения скорости перевозки снижает ее безопасность, а повышение безопасности может быть достигнуто снижением скорости перемещения грузов и пассажиров. Поэтому эти показатели следует учитывать и рассматривать одновременно при постановке и реализации целей управления ЖДТ системой страны, т.е. как сложной иерархической СТС. В этой связи обсуждаются также современные подходы к решению проблемы безопасности движения в условиях нештатных ситуаций.

Решение задачи совместной идентификации и оценивания параметров сигнала при параметрической априорной неопределенности и ограничении сверху возможного числа наблюдений можно получить за счет применения адаптивного байесовского подхода к наблюдениям. При этом общее и доступное число наблюдений в практических задачах идентификации опасности риска и оценки ее наиболее информативных параметров всегда ограничено. В связи со всем вышесказанным, рассмотрим математическую модель оценки приращения информационного риска для указанных условий функционирования ОУ как задачи о различении сложных гипотез.

*А. Информационные оценки для приращения среднего риска при изменении законов распределения вероятностей.* Рассмотрим типовую ситуацию идентификации слабо формализованной модели структуры ОУ в виде случайных параметров  $x = (x_1, \dots, x_n)$  в присутствии (мешающего или маскирующего) параметра  $\theta$ . Допустим, что экспериментально (в статистическом смысле) для вектора измеряемых случайных величин  $x = (x_1, \dots, x_n)$  и неизвестного параметра  $\theta$  определена функция плотности распределения вероятностей параметров модели в виде  $\tilde{p}(x, \theta)$  (аппроксимирующая в общем случае неизвестную истинную функцию  $p(x, \theta)$ ). Информационное расхождение (дивергенция) между функциями распределения вероятностей определяется мерой Кульбака-Лейблера в виде:

$I(p : \tilde{p}) = \iint p(x, \theta) \ln \frac{p(x, \theta)}{\tilde{p}(x, \theta)} dx d\theta$ . По заданным функциям потерь  $W(\tilde{W})$  и распределения вероятностей  $p(x, \theta) [\tilde{p}(x, \theta)]$  вычисляется усредненный риск в виде:

$$r(W^2)(\tilde{r}(\tilde{W}^2)) = \iint W^2 p(x, \theta) dx d\theta \left( \iint \tilde{W}^2 \tilde{p}(x, \theta) dx d\theta \right).$$

Тогда информационная оценка приращения риска (снижения точности определения параметров модели ОУ из-за редукции аппроксимации истинной функции плотности распределения вероятностей, как меры корректности модели) определяется следующим выражением:

$$-\sqrt{r(W^2)2I(\tilde{p} : p)} \leq (\delta = \tilde{r} - r) \leq \sqrt{\tilde{r}(W^2)2I(p : \tilde{p})}. \quad (3)$$

Таким образом, (верхняя и нижняя) оценка корректности модели в виде приращения риска  $(\delta = \tilde{r} - r)$  из-за редукции данных измерения при мешающих параметрах в процессах измерения носит *нелинейный* характер зависимости от информационной дивергенции – расхождения (меры информированности исследователя) оценок качества модели ОУ.

Приведенные результаты показывают, что исходного количества информации и интуитивного представления в виде информированности исследователя может оказаться недостаточным для формирования корректной модели ОУ, а сформированная модель содержит структурные элементы неопределенности. Следовательно, интуитивный инженерный подход к разработке приближенных (расчетных) моделей ОУ, носящий зачастую вид линейной зависимости от количества извлекаемой информации о параметрах структуры ОУ, может привести к существенному расхождению в точности и с необходимым качеством формирования корректного описания ОУ.

Таким образом, помимо физических ограничений, на корректность описания и достоверность извлеченных знаний из модели ОУ существенное влияние оказывают также и информационные границы на применимость разработанной модели. В теории и систем управления одним из эффективных подходов снижения риска принятия решения (от неполноты описания модели ОУ) является разработка структур ИСУ.

**Б. Применение информационных оценок рисков в технологии проектирования робастных баз знаний в ИСУ.** В теории и систем управления одним из эффективных подходов снижения риска принятия решения (от неполноты описания модели ОУ) является разработка структур ИСУ. Важной проблемой в создании ИСУ является разработка методов и алгоритмов повышения надежности и качества управления исполнительского (нижнего) уровня САУ, основанного на традиционном ПИД-регуляторе. При этом выполняется принцип «*неразрушения исполнительского уровня*», что приводит к эффективному использованию существующих отлаженных промышленных технологических процессов. Использование нечетких регуляторов (НР) совместно с ПИД-регулятором привело к созданию гибридных ИСУ с различными уровнями интеллектуальности в зависимости от полноты и корректности спроектированной БЗ.

Под термином БЗ понимается стандартное для теории НР определение БЗ в виде конечного множества продукционных правил определенной модели нечеткого вывода с конкретными типами и параметрами функций принадлежности, формирующих законы управления ОУ. Параметры и тип функции принадлежности хранятся в базе данных НР.

Одной из трудностей разработки ИСУ для непредвиденных ситуаций управления и условий риска является решение проблемы проектирования соответствующей БЗ, использующей объективные знания о поведении объекта управления (ОУ) и нечетких ПИД-регуляторов. В связи с этим, одной из сложных и ключевых проблем разработки основы информационной технологии проектирования ИСУ для такого широкого класса ОУ является создание процесса извлечения объективных знаний и этапов проектирования на их основе робастных БЗ в непредвиденных ситуациях управления для исполнительского уровня иерархической структуры управления, учитывающего в продукционных правилах БЗ реальные физические и информационные ограничения.

В частности, в качестве информационных ограничений рассматриваются информационные оценки приращения риска, которые учитываются в части посылки «*Если...*» продукционных правил «*Если ... То ...*».

Например, рассмотрим традиционную структуру логического нечеткого вывода в виде продукционных правил «*Если  $A$  То  $B$* », где  $A$  и  $B$  нечеткие лингвистические переменные. В НР, лингвистические переменные  $A$  и  $B$  описываются соответствующим набором функций принадлежности, вид и параметры которых задаются ОБЗ на мягких вычислениях. При этом структура логической посылки  $A$  записывается в виде:

**Если** ошибка  $e$  малая величина, скорость ошибки  $\dot{e}$  средняя величина и накопление ошибки  $\int edt$  средняя величина,

**То** параметры регулятора  $k_p$  большая величина,  $k_d$  малая величина,  $k_i$  средняя величина

Отметим, что в такой структуре информационный риск не учитывается.

В нашем случае структура логической посылки имеет следующий вид:

**Если** ошибка  $e$  малая величина, скорость ошибки  $\dot{e}$  средняя величина, накопление ошибки  $\int edt$  средняя величина, и степень риска  $\delta$  средняя величина,

**То** параметры регулятора  $k_p$  средняя величина,  $k_d$  большая величина,  $k_i$  малая величина. При этом информационная оценка риска  $\delta = \tilde{r} - r$  и определяется верхней и нижней границей информационных расхождений в (3).

Следовательно, учет в продукционных правилах «Если  $A$  То  $B$ » величины приращения информационного риска  $\delta$  в виде лингвистической переменной позволяет применить методологию проектирования БЗ на основе мягких вычислений с учетом приращения информационных оценок риска.

**В. Матрица риска.** Наиболее простым способом качественного предварительного анализа рисков, особенно когда отсутствуют необходимые данные или их очень мало, является применение диаграмм в системе координат *Вероятность (Частота) события / Последствия события* на основе составления так называемой *матрицы риска*.

Стандартная идея и алгоритм формирования матрицы рисков показаны на рис. 9.

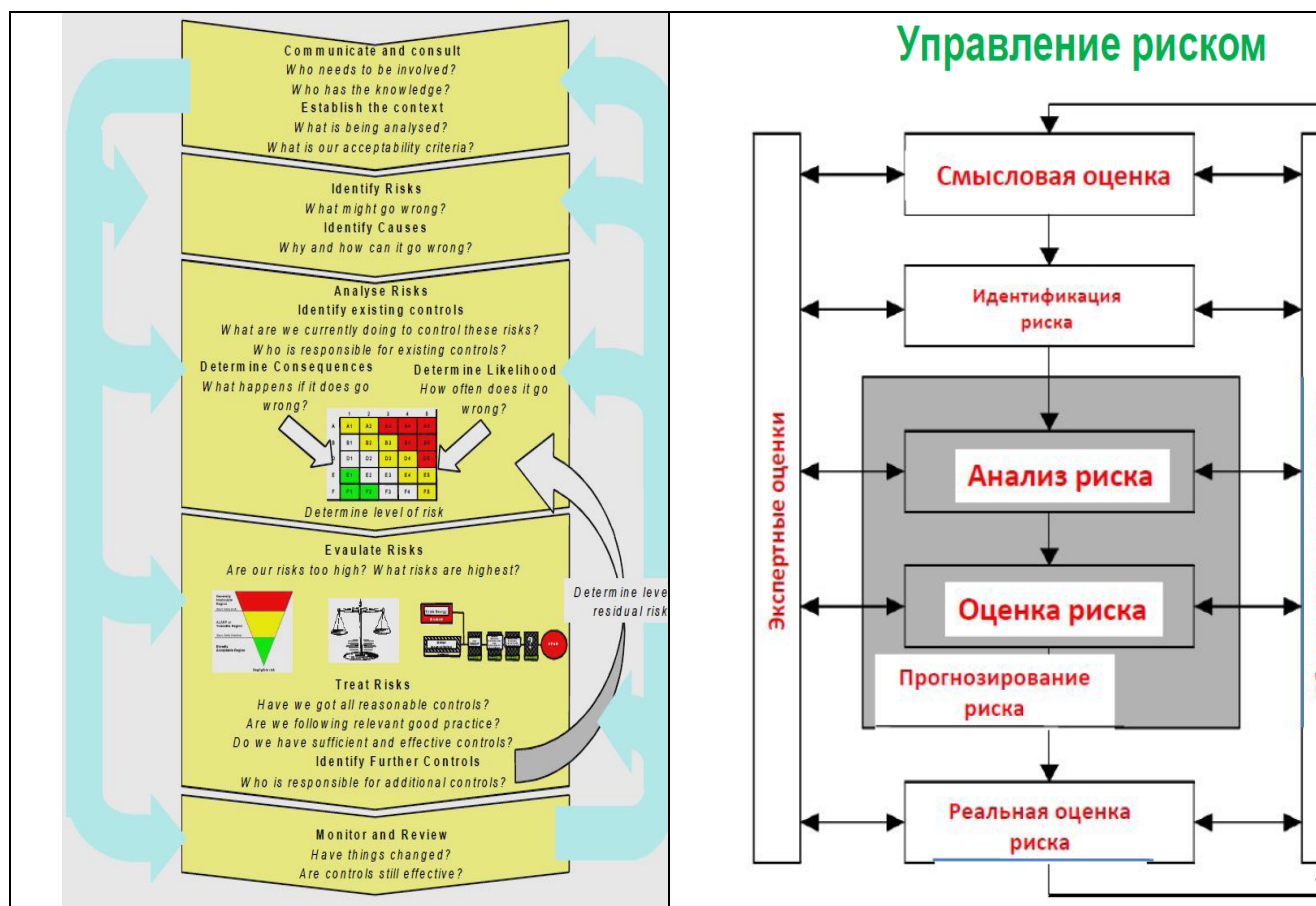


Рис. 9. Формирования матрицы рисков

Пример сформированной матрицы рисков для нештатных ситуаций показан на рис. 10.

| Example Risk Matrix (simplified description only) |                           |               |       |      |                  |                            |               |       |      |            |
|---|---------------------------|---------------|-------|------|------------------|----------------------------|---------------|-------|------|------------|
| Hazard  | Risks                     | Inherent Risk |       |      | Risk Controls    |                            | Residual Risk |       |      | Evaluation |
|   |                           | L'hood        | Consq | Risk | Control 1        | Control 2                  | L'hood        | Consq | Risk |            |
| Signal Passed at danger                           | Potential Train Collision | 6             | 6     | 12   | Driver training  | Rule Book                  | 5             | 5     | 10   | High       |
| Infrastructure defect                             | Derailment                | 6             | 6     | 12   | Track Standards  | Track Inspections          | 5             | 4     | 9    | High       |
| Smoking on train                                  | Train on Fire             | 4             | 6     | 10   | No Smoking Rules | Fire Extinguisher on train | 3             | 3     | 6    | Moderate   |

| Risk Evaluation Table |   |             |   |   |    |    |    |
|-----------------------|---|-------------|---|---|----|----|----|
| Likelihood            |   | Consequence |   |   |    |    |    |
|                       |   | 1           | 2 | 3 | 4  | 5  | 6  |
|                       | 6 | 7           | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|                       | 5 | 6           | 7 | 8 | 9  | 10 | 11 |
|                       | 4 | 5           | 6 | 7 | 8  | 9  | 10 |
|                       | 3 | 4           | 5 | 6 | 7  | 8  | 9  |
|                       | 2 | 3           | 4 | 5 | 6  | 7  | 8  |
|                       | 1 | 2           | 3 | 4 | 5  | 6  | 7  |

Рис. 10. Пример сформированной матрицы рисков для нештатных ситуаций

Возможны два вида оценок: количественная и качественная.

Количественная оценка риска выражает возможность осуществления угрозы (ее вероятность), воздействие и риск в числовых величинах. Качественная оценка используется для выражения того или иного значения шкалу оценок: высокий, средний, низкий. Если используемая количественная метрика оказывается недостаточно полной, точной или адекватной, то количественный подход имеет либо малые, либо вообще не имеет преимуществ перед качественным подходом, так как приходится использовать субъективную интерпретацию количественных характеристик.

Для разрешения подобных ситуаций адекватно подходит теория нечётких множеств, применение которой упрощает принятие решения по сложно формализованным и неформализованным задачам. Поэтому большинство подходов к оценке риска начинают с использования качественных показателей ранжирования (высокий, средний, низкий) и присваивают диапазон значений каждому из трех показателей.

Пример формирования матрицы риска на шкале лингвистических переменных, качественные характеристики и их содержательные определения для каждого из уровней приведен на рис. 11.

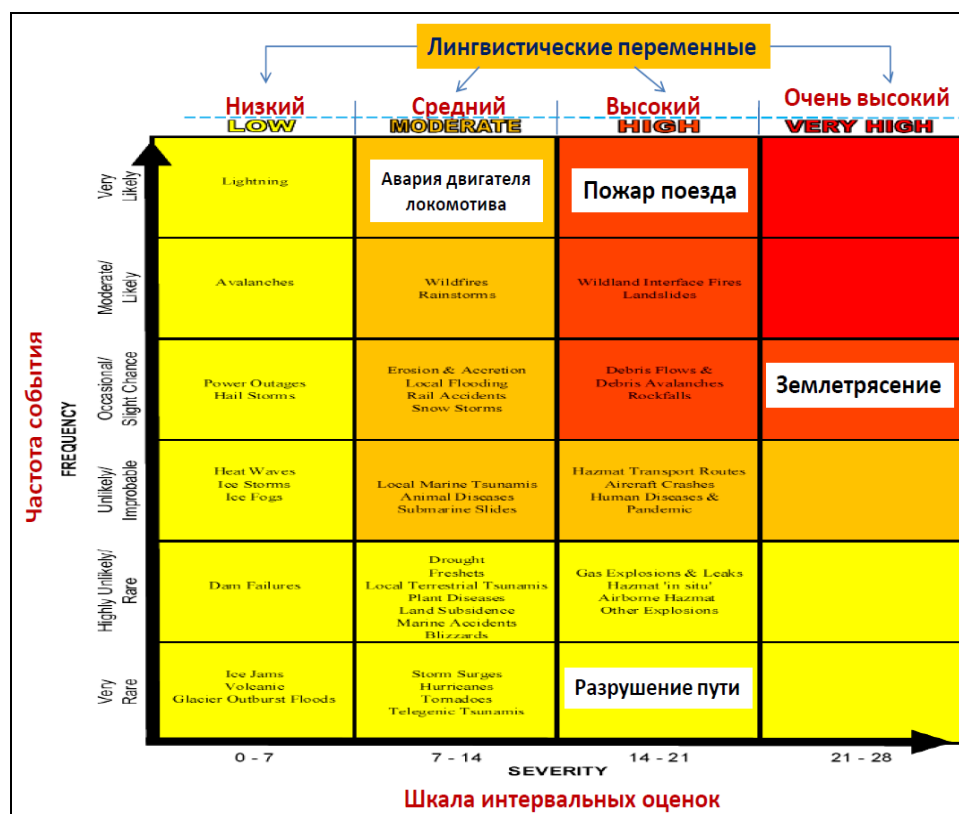


Рис. 11. Пример матрицы риска для нештатных ситуаций движения ЖДТ

Для формирования матрицы риска на шкале лингвистических переменных можно воспользоваться MatLaB-программой типа SCOtKB™.

Данная программа позволяет оперировать лингвистическими переменными и создавать для них продукционные правила вывода. В интерактивном режиме можно наблюдать за показателями каждой из переменных, а также за уровнем истинности каждого из правил (см. рис. 12).

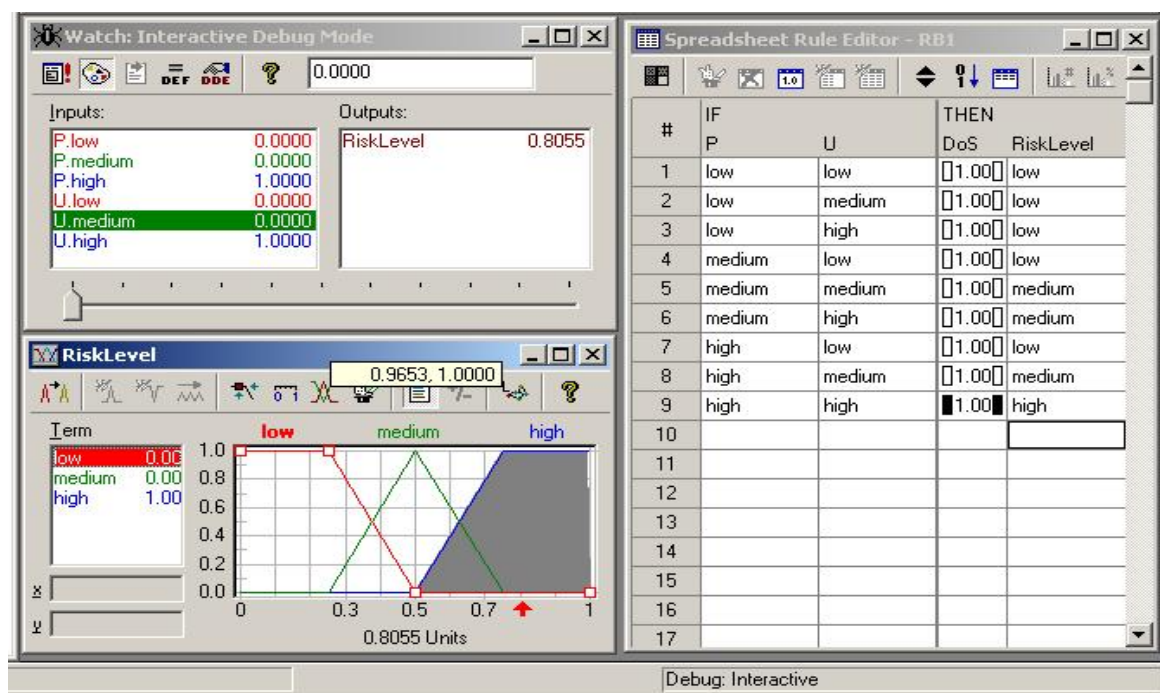


Рис. 12. Интерактивный режим программы описания лингвистических переменных



Для описания вероятности возникновения возьмём лингвистическую переменную «Р» с тремя термами: «high», «middle» и «low». Для описания величины ущерба от информационного риска возьмём лингвистическую переменную «U» с тремя термами: «high», «middle» и «low». Для описания уровня риска возьмём лингвистическую переменную «RiskLevel» с тремя термами: «high», «middle», «low». Далее создаются две входных и одна выходная переменные, соответствующие лингвистическим переменным «Р», «U» и «RiskLevel» соответственно. Затем формируется блок правил, в который заносятся правила, описанные выше.

Запустив интерактивный режим, можно изменять значения переменных «Р» и «U», наблюдать за степенью истинности правил и наблюдать за результатом переменной «RiskLevel». Использование теории нечётких множеств позволяет корректно получить оценку риска в условиях неопределённости значений показателей риска, а также при выборе из группы рисков нескольких, которые должны удовлетворять определённому критерию. Пользователь программы может предварительно выставить характерные значения для каждого из термов, либо пользоваться термами без численных значений для качественной оценки параметров.

*Иерархическая ИСУ ЖДТ принятия решения в нештатных ситуациях с учетом информационного риска.* Комплексные ИСУ в первую очередь ориентированы на получение независимой от персонала объективной исходной информации. Обработка этой информации осуществляется с помощью автоматизированных систем, имеющих в своем составе аналитические и экспертные модели, которые поддерживают работу персонала, отвечающего за безопасность движения.

На рис. 13 показана структура комплексной ИСУ ЖДТ с учетом условий риска и непредвиденных ситуаций.

В качестве примера ниже рассмотрена нештатная ситуация «Авария двигателя локомотива» и обсуждается задача экстренного аварийного останова локомотива с использованием разработанной ИСУ.

В общем случае структура комплексной ИСУ ЖДТ включает ситуационный центр и ИСУ рисками и безопасностью движением. Ситуационный центр включает в себя логистическую информационно-аналитическую систему сбора, обработки данных для формирования факторов матрицы риска инфраструктуры ЖДТ и интеллектуальную систему принятия решения в условиях нештатных и непредвиденных ситуаций управления. Матрица риска, сформированная в ситуационном центре на основе требований технического регламента к безопасности и текущей информации, по запросу из интеллектуальной системы принятия решений выдает оценку уровня риска текущей нештатной ситуации.

Выходной сигнал интеллектуальной системы принятия решений описывает требования к необходимому уровню робастности ИСУ движением в условиях нештатных ситуаций. Уставка требуемого уровня интеллектуальности отвечает уровню требуемой робастности ИСУ движением и поступает в блок самоорганизации БЗ в нештатных ситуациях. ОУ получает управляющее воздействие для устранения нештатной ситуации из ИСУ движением на основе продукционных правил, сформированных в самоорганизующейся БЗ. Блок моделирования нештатных ситуаций на основе базы данных и собственной БЗ формирует для блока самоорганизации БЗ рекомендации на выбор вида управления с учетом запроса из базы данных контроля показателей безопасности. В данном разделе кратко опишем работу ИСУ безопасностью движением в условиях риска и нештатных ситуаций. Методика формирования матрицы риска была рассмотрена выше.

На рис. 14а,б,в показано принципиальное решение структурной реализации ИСУ движением в нештатной ситуации для блоков автодиспетчера и автоведения на рис. 13.

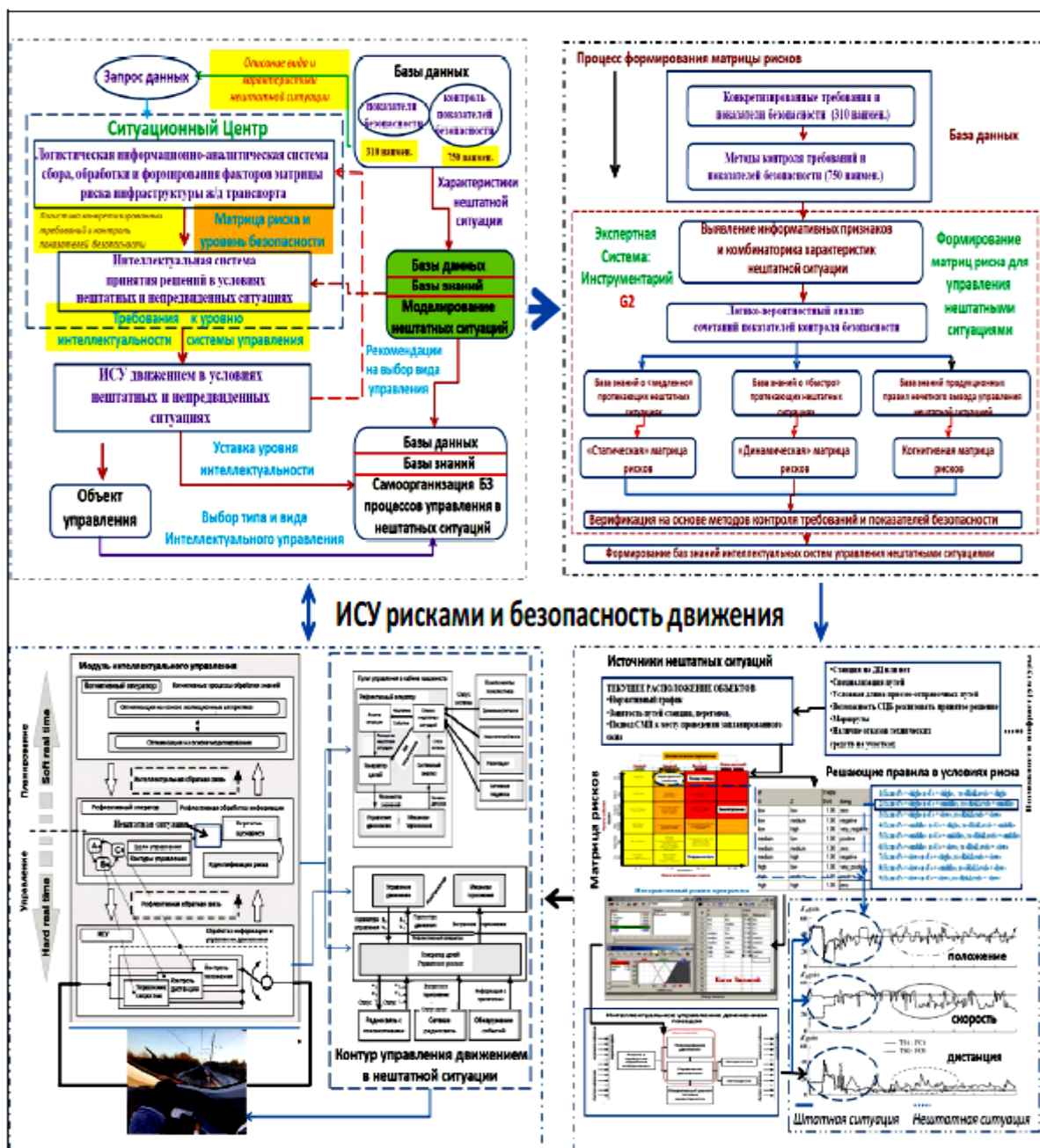
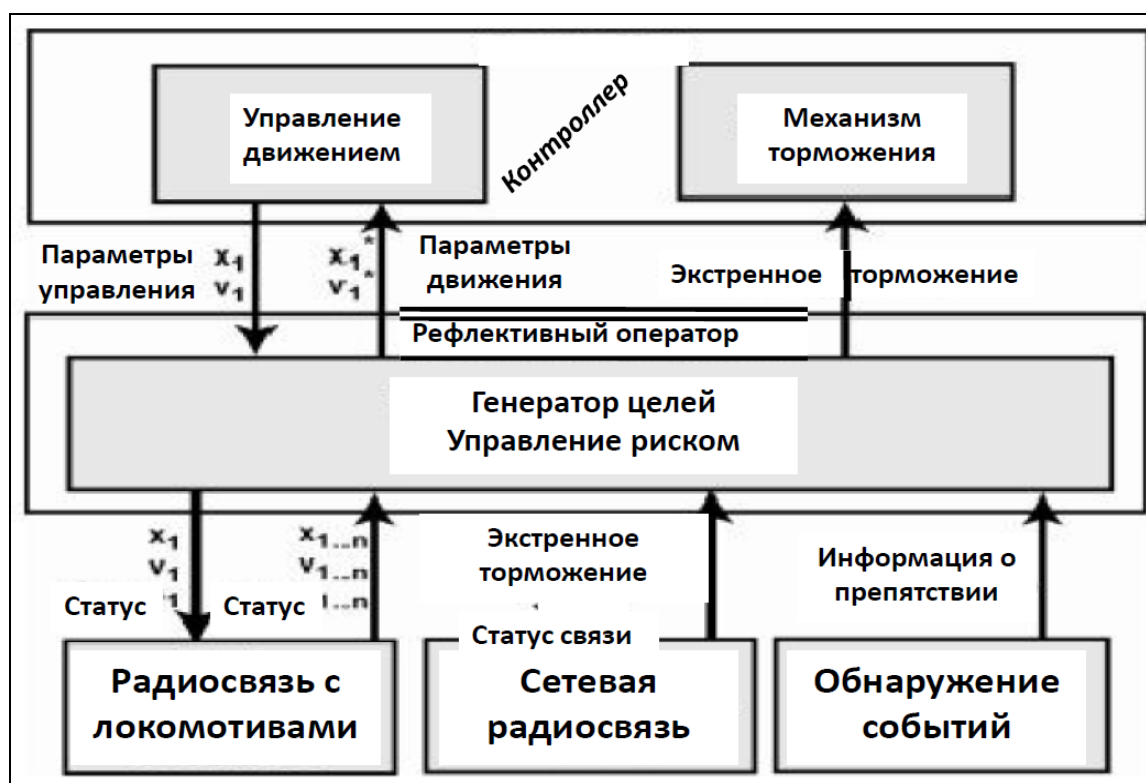


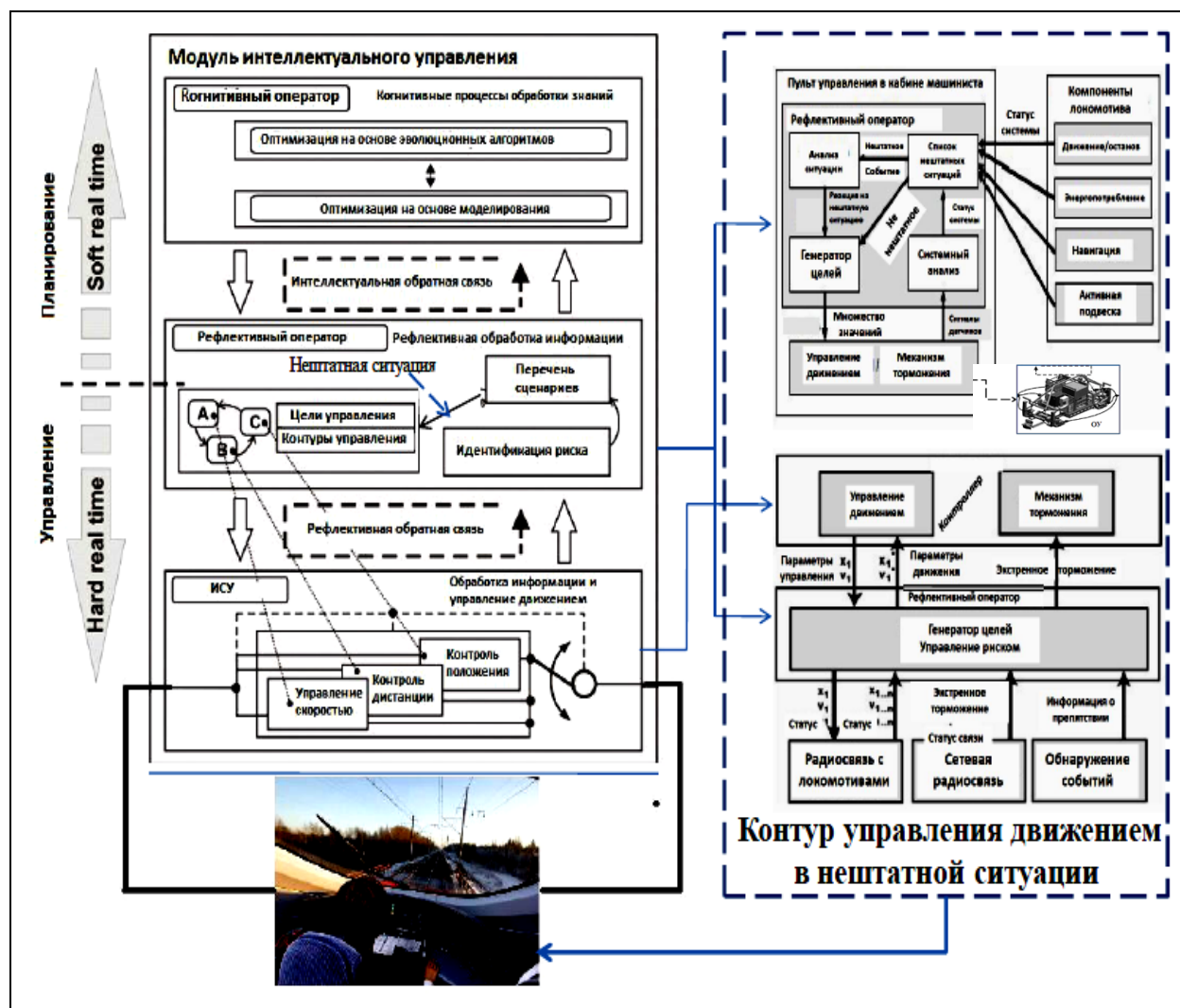
Рис. 13. Структура комплексной ИСУ ЖДТ с учетом риска и непредвиденных ситуаций



(а)



(б)



(в)

Рис. 14. Принципиальное решение реализации автомашиниста с интеллектуальным управлением движения локомотива в нештатных ситуациях

Согласно рис. 14,а пульт управления в кабине машиниста оснащен блоком рефлективного оператора, состоящего из подблока «Анализ ситуации», подблока «Генератор целей», подблока «Список нештатных ситуаций» и подблока «Системный анализ».

Сам блок рефлективного оператора работает в интерактивном режиме обмена информацией. Это означает, что в случае возникновения нештатной ситуации из подблока «Список нештатных ситуаций» в подблок «Анализ ситуаций» поступает сигнал «Нештатное событие». В результате работы подблока «Анализ ситуаций» выдается выходной сигнал – реакция на нештатную ситуацию, который является входным сигналом для подблока «Генератор цели». В результате подблок «Генератор цели» по входному сигналу из подблока «Анализ ситуации» и по идентифицирующему сигналу из подблока «Список нештатных ситуаций» вырабатывает множество значений управляющих сигналов, подаваемых в подблок «Управление движением».

В результате в подблоке «Системный анализ» по входным сигналам датчиков обнаружения нештатных ситуаций определяется статус системы в непредвиденной ситуации управления, с помощью которого формируется управление компонентами локомотива. При этом сам интеллектуальный контроллер содержит подблок «Управление движением» и подблок «Механизм торможения».

В случае обнаружения нештатной ситуации в модуль «Интеллектуальное управление» из ситуационного центра, деятельность которого связана с задачами реагирования на чрезвычайные ситуации, их прогнозирования и предупреждения, поступает информация о текущей непредвиденной ситуации управления. Обнаруженная нештатная ситуация оценивается с помощью матрицы рисков и информация передается на «Рефлективный оператор».

В результате после анализа и обработки принятое решение поступает в виде управляющих параметров движения на интеллектуальный контроллер. Интеллектуальный контроллер с заложенными в него алгоритмами нечеткой логики на основе поступившей информации выдает сигнал «Экстренное торможение».

При обнаружении другого события (потенциально опасного объекта, например, препятствия) по Рефлективный оператор посредством сетевой радиосвязи с локомотивом получает параметры движения локомотива и также передает их в интеллектуальный контроллер. Подблок интеллектуального контроллера «Управление движением» на основе полученных от Рефлективного оператора параметров движения формирует параметры управления и возвращает их на блок Рефлективный оператор. Интеллектуальный контроллер (см. рис. 14) с заложенными в него алгоритмами нечеткой логики на основе поступившей информации выдает сигнал Экстренного торможения и подает его на механизм торможения и активную подвеску локомотива.

Машинист локомотива может данное решение системы упредить, но если он этого не сделает, тормозная система срабатывает автоматически от управляющего сигнала интеллектуального контроллера. Система срабатывает точнее, чем это сделал бы машинист, т.к. использует такие информационные переменные, которые машинист учитывает лишь приблизительно (контроль скорости, контроль дистанции, контроль положения) или не способен учесть в силу объективных причин.

На рис. 15 показан интерфейс пользователя для формирования продукционных правил для текущей нештатной ситуации.

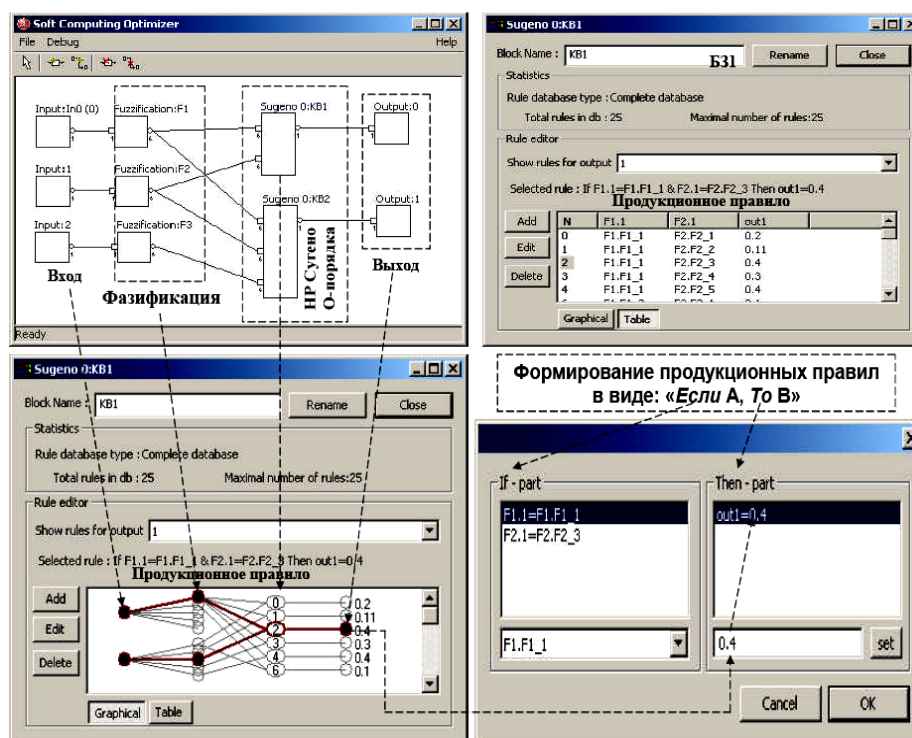


Рис. 15. Графический интерфейс пользователя формирования продукционных правил

На рис. 16 показаны результаты работы продукционных правил в БЗ интеллектуального контроллера законов изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора тормозной системы останова поезда.



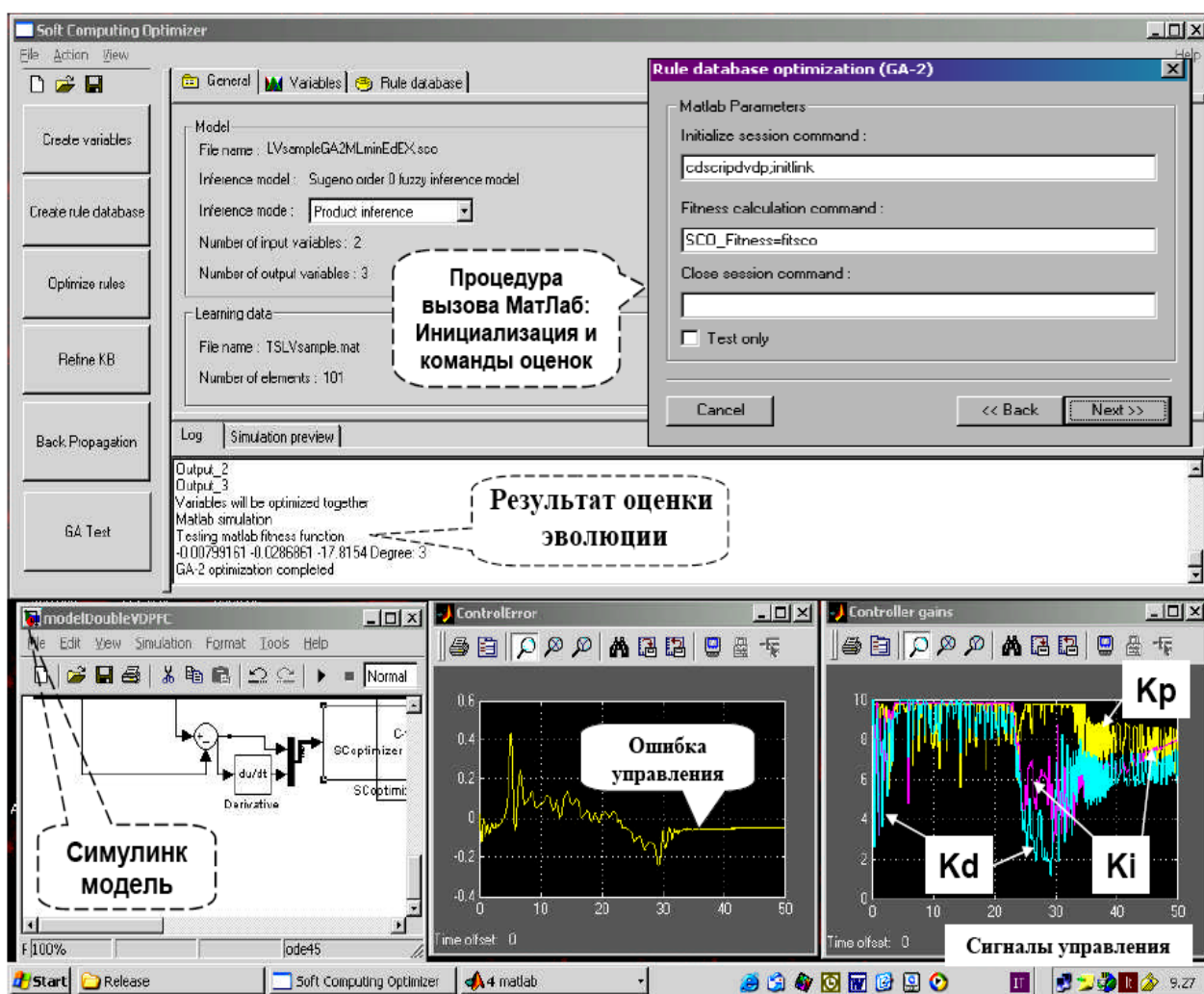
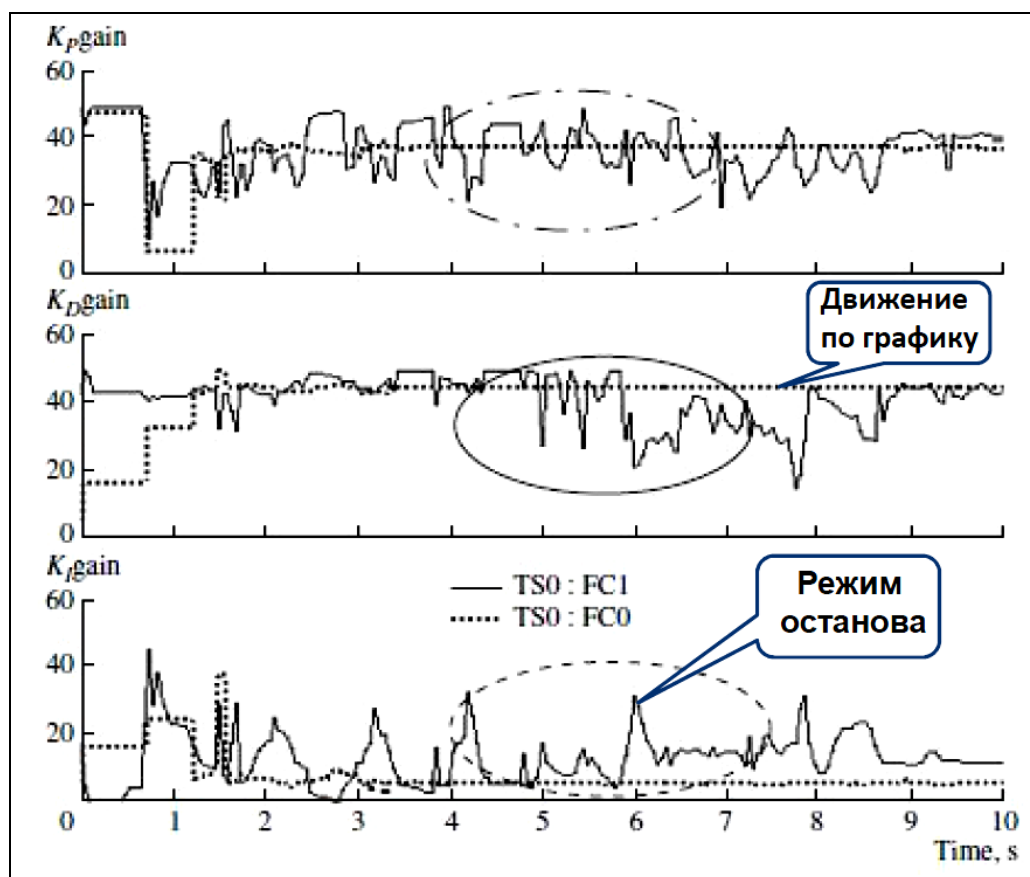


Рис. 16. Формирование законов управления изменением коэффициентов усиления

Методология погружения матрицы рисков в систему безопасности инфраструктуры и управления движением ЖДТ показана на рис.17. В частности, на рис. 17 показан результат применения матрицы рисков в системе контроля инфраструктуры и управления движением ЖДТ (а) и законы управления изменением во времени коэффициентов усиления ПИД-регулятора тормозной системы (б) локомотива для нештатной ситуации «Авария двигателя локомотива» согласно результатам моделирования, представленных на рис. 17.





(б)

Рис. 17. Применение матрицы рисков в системе контроля инфраструктуры и управления движением ЖДТ (а) и законы коэффициентов усиления ПИД-регулятора тормозной системы (б)

Модель информационной оценки риска нештатной ситуации позволяет повысить робастность БЗ. Это обеспечивается включением параметров риска нештатной ситуации в продукционные правила управления интеллектуального регулятора. С помощью представленной структуры ИСУ возможно достичь эффективного управления в нештатной ситуации с минимальной потерей полезного ресурса и максимальным уровнем безопасности движения ЖДТ.

## Список литературы

1. Караткевич С.Г., Добрынин В.Н., Ульянов С.В. Интеллектуальное управление социотехническими системами. – М.: ВНИИГеосистем. – 2011.
2. Camazine S. Self-organization in biological systems. – Princeton: Univ. Press, 2003.
3. Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems // Reviews of Modern Physics. –2001. –Vol. 73. – № 4. – Pp. 1067-1141.
4. Ben-Jacob E., Levine H. Self-engineering capabilities of bacteria // J. R. Soc. Interface. – 2006. – Vol. 3. – № 2. – Pp. 197-214.
5. Castllano C., Fortunato S., Loreto V. Statistical physics of social dynamics // Review of Modern Physics. – 2009. – Vol. 81. – №2. – Pp. 591-646.
6. Добрынин В.Н., Ульянов С.В., Лобачева М.В., Тятюшкина О.Ю., Ефремов Г.А. Самоорганизация и интеллектуальное управление развитием социотехнических систем. Ч.1. Состояние и пути решения проблемы // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2010. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/17>. – 0421000111\0021.
7. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат И.И., Ульянов С.В., Теория моделей процессов управления: Термодинамические и информационные аспекты. – М.: Наука, 1978.



8. Мишин А.А., Добрынин В.Н., Литвинцева Л.В., Технология мягких вычислений в проектировании интеллектуальных систем управления // Программные Продукты и Системы (ППС). – 2010. – № 1.
9. Минзов А.С., Шевяхов М. Ю. Некоторые подходы к оценке информационного риска с использованием нечетких множеств // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2010. – №1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/15>. – 0421000111\0007.
10. Тятюшкина О.Ю., Ульянов С.В. Математическая модель информационной оценки риска и управление безопасностью социотехнических систем: Формирование робастных баз знаний // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2011. – №2. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/20>. – 0421100111\0014.
11. Ulyanov S.V. Quantum control algorithm of robust KB self-organization process based on quantum fuzzy inference. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ntpdubna.ru/archive/Self-organization.pdf>.
12. Прикладные интеллектуальные системы, основанные на мягких вычислениях (под ред. Н.Г. Ярушкиной). – Ульяновск: УлГТУ, 2004.
13. Рыжов А.П. Элементы теории нечетких множеств и её приложений. – М.: МГУ, 2003.
14. Fuchs Ch. The Internet as a self-organization social-technological system. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.self-organization.org>.
15. Kurakin A. The universal principles of self-organization and the unity of Nature and knowledge // The SOFT. – 2007. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alexekurakin.org/text/thesoft.pdf>.