

ИСКУССТВЕННАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ И ЭВРИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ СВОЙСТВ НАДЕЖНОСТИ, ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Доктор техн. наук *А.Ф. Берман*

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН

Принцип самоорганизации свойств сложных технических систем представлен синтезом эвристической иерархической трансдисциплинарной модели, метаэвристических и эвристических правил. Модель и правила формируют процесс решения в зависимости от рассматриваемого объекта, стадии состояния объекта и научно-отраслевого аспекта описания состояний. Принцип самоорганизации основан на использовании метаэвристик, формирующих задачи и аналитические блоки для их решения. Блоки обеспечивают решение междисциплинарных задач для каждого уровня иерархии: структурного, динамического и процедурного. Непосредственная самоорганизация свойств осуществляется с помощью экспертных систем и вычислительных модулей на основе эвристических правил, аналитических и эмпирических моделей.

Ключевые слова: технические свойства, физические свойства, функциональные свойства метаэвристики, эвристики, аналитический блок, экспертные системы, эвристическая модель, вычислительные модули, катастрофический отказ, аварийная ситуация, авария, техногенная чрезвычайная ситуация, трансдисциплинарная задача, междисциплинарная задача.

SELF-ORGANIZATION AND A HEURISTIC APPROACH FOR SUBSTANTIATION OF PROPERTIES OF RELIABILITY, VIABILITY AND SAFETY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Dr (Tech) *A.F. Berman*

Matrosov Institute for Systems Dynamics and Control Theory SB RAS

The principle of self-organization of the properties of complex technical systems is represented by a synthesis of a heuristic hierarchical transdisciplinary model, metaheuristic and heuristic rules. The model and rules form the decision process depending on the object in question, the stage of the state of the object and the scientific and industrial aspect of the description of states. The principle of self-organization is based on the use of metaheuristics that form tasks and analytical blocks for their solution. Blocks provide a solution to interdisciplinary tasks for each level of the hierarchy: structural, dynamic and procedural. Direct self-organization of properties is carried out using expert systems and computational modules based on heuristic rules, analytical and empirical models.

Keywords: technical properties, physical properties, functional properties of metaheuristics, heuristics, analytical unit, expert systems, heuristic model, computational modules, catastrophic failure, emergency, accident, technological emergency, transdisciplinary task, interdisciplinary task.

Введение. Имеющие место катастрофические отказы и аварии вследствие разрушения деталей и несущих конструкций сохраняют проблему повышения свойств надежности, живучести и безопасности Сложных Технических Систем (СТС). Исследования ведутся в направлении обоснования необходимых свойств на разных масштабных уровнях струк-

*Работа выполнена при частичной поддержке грантом РФФИ №18-08-00560.

туры материала, конструкции и СТС в целом, а также повышения качества и снижения сроков их проектирования [1-6].

Структурное резервирование не может обеспечить безопасность при некоторых видах отказов, например, обусловленных сквозными трещинами, хрупким или вязким разрушением или нарушением герметичности соединений элементов или компонентов СТС, что приводит к истечению или выбросу опасных веществ в окружающее пространство. Снижение частоты (вероятности) таких отказов осуществимо только прочностным и ресурсным резервированием компонентов и элементов систем [7-11]. Подобное резервирование, обеспечивается соответствующими коэффициентами запаса, которые повышают расчетные показатели прочности, несущей способности и ресурса и тем самым, совместно с методами и средствами периодического диагностирования, обеспечивают гарантированную безопасность по расчетным критериям.

Необходимо отметить, что при рассмотрении прочностной и ресурсной безопасности исключать из рассмотрения возможность воздействия нерасчетных нагрузок любого происхождения, ошибок при проектировании и эксплуатации, категорически нельзя. В результате, принятие решений переходит в область высокого уровня неопределенности и требует применения новых методов и средств обоснования и обеспечения свойств надежности, живучести и безопасности. Это требует увеличения объемов предпроектных исследований, стоимости проекта и объекта. Для обоснованного назначения коэффициентов запаса необходимо знать фактические свойства объекта, обеспечивающие требуемое резервирование, и учесть как возможный разброс этих свойств, так и разброс воздействующих факторов. Изменение свойств в процессе эксплуатации ограничивается некоторыми признаками и параметрами, например, критериями отказов и предельных состояний, которые требуют непрерывного или периодического контроля. Для этого необходимо определить вероятные деградиационные процессы, их скорость и параметры повреждений ими вызываемые и обосновать адекватные методы, средства и периодичность контроля. Это обеспечит своевременное выявление предельных состояний и предупреждение катастрофических отказов.

Обоснование соответствующих свойств при статических нагрузках, отсутствии активной контактной среды и стабильных воздействующих факторах осуществляется с достаточной степенью точности. Однако, точность прогнозирования несущей способности и ресурса при переменных нагрузках, в присутствии активных сред, а также в условиях недостаточно контролируемых колебаний воздействующих факторов и свойств объектов не всегда обеспечивает требуемую надёжность и безопасность. К таким СТС относится оборудование химических, нефтехимических, энергетических и некоторых других опасных и энергоёмких сложных производств.

Целью исследования является разработка принципа и модели самоорганизации, обеспечивающих обоснование свойств надёжности, живучести и безопасности СТС, их компонентов и элементов по критериям прочности и ресурса, основанных на пространстве технического состояния СТС.

Постановка проблемы. Одним из направлений повышения эффективности и качества процесса поддержки принятия решений является использование принципов самоорганизации [12-15]. Предлагаемые принципы позволяют обеспечить достижение поставленных целей посредством автоматизации процессов в отсутствие сложной системы управления, обеспечение надежности которой является самостоятельной проблемой. Кроме того, системы управления не обеспечивают корректировку управляющих воздействий, если возникает необходимость использования новых знаний, не включенных в модель управления или в модель управляемого объекта.

Проблема состоит в том, чтобы сформулировать принцип и модель Самоорганизации, которые бы обеспечили эффективную и качественную обработку знаний и дан-

ных для обоснования свойств надёжности, живучести и безопасности СТС, их компонентов и элементов.

Самоорганизующиеся системы или процессы способны изменять свою структуру, параметры, алгоритм функционирования и т.д. для достижения цели. Свойствами самоорганизации является адаптируемость, самообучаемость, способность к распознаванию ситуации, интероперабельность (функциональная совместимость с другими системами). Самоорганизующийся процесс – это динамический адаптивный процесс, ведущий к возникновению и поддержанию структуры системы без специфического внешнего управления. К неспецифическим внешним воздействиям относят такие, которые не являются непосредственно управляющими, но которые «запускают» механизм самоорганизации. Если в адаптивной системе изменяется закон функционирования, т. е. состав и структура системы, то ее обычно называют самоорганизующейся. Правила же искусственной самоорганизации, которая протекает в разрабатываемых искусственных системах, задает «разработчик системы» на основе предварительно сформулированных правил [16-21].

Некоторые аспекты применения принципа самоорганизации для обоснования свойств СТС и снижения риска аварий опубликованы в работах [22-25]. В данной работе, под свойствами безопасности понимается механо-физико-химическая и структурная способность объектов, выполняя свои функции, противостоять зарождению и развитию опасных повреждений, катастрофических отказов и аварий, минимизировать их последствия для обеспечения приемлемого уровня риска. Свойства безопасности характеризуются совокупностью параметров, отражающих состояние объектов в различные моменты времени и удовлетворяющих техническим требованиям. Интегральным свойством, характеризующим безопасность объекта, является величина риска, представленная совокупностью последствий аварий и их частоты. При этом желательно, чтобы величина риска не изменялась существенно и находилась в пределах планируемых значений до момента локализации аварии и тем самым обеспечивалась требуемая безопасность в чрезвычайной ситуации.

Прочностная и ресурсная безопасность СТС зависят от соответствующих свойств компонентов (сборочных единиц) и элементов (деталей), входящих в их состав, а также от незапланированных воздействий и некоторых неопределенностей свойств материалов и конструкций. Ресурс ограничен продолжительностью деградационных процессов, протекающих в материале, и обусловленных сочетанием многочисленных воздействующих факторов и свойств материала, не всегда известных с достаточной степенью точности. Так как подобные сочетания практически неисчислимы, а закономерности деградационных процессов не всегда известны, то проблема оценки прочностной и ресурсной надежности и безопасности, для вновь создаваемых СТС, является многокритериальной, многопараметрической, а значит мульти- и междисциплинарной. Необходимо чтобы разрабатываемые методы и модели обеспечивали интегрированное применение, как существующих теоретических и эмпирических, так и актуальных экспертных знаний, а также текущей информации из различных источников. Решение подобных задач требует совершенствования методов и средств, как за счёт новых подходов к моделированию, так и использования возможностей современных информационных технологий и искусственного интеллекта.

Нестыковка знаний как в пределах одной науки, и тем более между различными науками — одно из главных препятствий для развития междисциплинарных исследований. Требуется синтез знаний различных наук. Например, при решении задачи обоснования требуемых свойств материала детали (элемента) необходимо не только достаточно точно знать о возможных воздействующих факторах, свойствах материала после металлургических и технологических процессов, сопровождающих изготовление конкретной детали,

но и о механо-физико-химических закономерностях изменения свойств под воздействием факторов для установления обоснованных запасов прочности, несущей способности и ресурса. «Полезность междисциплинарного подхода к изучению различных процессов очевидна, и доказана многими достижениями в различных областях науки. Возможно, такой подход, позволяющий использовать достижения в смежных научных областях, и является наиболее эффективным, хотя он требует глубокого погружения в смежную область исследования и часто сталкивается со многими трудностями, а иногда, и с активным сопротивлением исследователей с обеих сторон от границы, разделяющей разные области знаний» [26].

При трансдисциплинарном подходе [22], когда для обеспечения надежности и безопасности сложных технических систем необходимо согласовать результаты решения множества междисциплинарных и дисциплинарных задач, трудностей становится еще больше. Методы оценки и обеспечения прочностной надежности и безопасности не обладают развитыми методами и моделями, обеспечивающими взаимосвязь закономерностей, описываемых различными научно-техническими дисциплинами. В значительной степени используются эмпирические коэффициенты. В частности, прочностная надежность детали характеризуется запасами прочности и ресурса, но аналитические модели, связывающие параметры прочностной и ресурсной надежности с уровнем риска, пока отсутствуют, что обуславливает некоторую неопределенность результатов. Динамические модели зависимости надежности от распределений прочности и напряжений [27] не решают этой проблемы в необходимой степени, так как отсутствуют распределения для различных сочетаний нагрузок и конструктивных свойств материала, в частности, при совместном воздействии нагрузок и сред.

Для решения поставленных задач в работе используется эвристический подход, обеспечивающий эмпирическое решение сложных проблем за приемлемое время, теоретически не обосновывая их правильность или оптимальность. Эвристики являются правилами, которые формируют соответствующий алгоритм и находят приемлемые решения нестандартных задач эмпирическим путем [28-30].

Метаэвристики и эвристики формализуются в виде модели правил [31]:

ЕСЛИ A_1 И A_2 И ... И A_n , ТО B_1 ИЛИ B_2 ИЛИ ... ИЛИ B_m ,

Где A_i и B_j — некоторые высказывания, к которым применены логические операции И и ИЛИ. Если высказывания в левой части правила (условие) истинно, истинно и высказывание в правой части (следствие). Правила обеспечивают сочетание эвристического и алгоритмического подходов при решении нестандартных задач.

В работе [32] отмечается, что кибернетические системы управления не могут учесть все возможные возмущающие факторы и «Если считать, что все управление происходит сверху донизу адресным способом, то система становится очень сложной... Если заданы условия игры, автоматы уже сами находят нужные действия. При этом они не нуждаются в индивидуальных указаниях». Создание новых сложных технических систем требует постоянного совершенствования технологии (процесса) обоснования свойств техногенной безопасности, а также методов и средств реализации технологии, включая современные системы управления и искусственного интеллекта [33-36].

Результаты. Модель трансдисциплинарной задачи обоснования свойств техногенной безопасности рассмотрена в работе [22]. На данном этапе модель трансдисциплинарной задачи представлена в виде трех иерархических уровней (табл. 1,2) отражающих структуру СТС, а также временную (по горизонтали) и информационную (по вертикали) иерархические структуры, представленные классами состояний. Модель отражает координацию и взаимосвязь классов пространства состояний для обоснования свойств безопасности СТС в представленных дискретных состояниях.

Таблица 1

Эвристическая трансдисциплинарная модель и Аналитические Блоки (АБ_{у,в}) обоснования свойств надежности, живучести и безопасности соответственно СТС, Компонентов-К и Элементов-Э на докритической стадии деградации:
МДЗ- междисциплинарные задачи; ЭС- экспертные системы;
ВМ – вычислительные модули

| Обосновать свойства надёжности, живучести и безопасности СТС, Компонентов и Элементов (первый иерархически уровень): | | | | |
|--|---|--|--|--|
| Цели исследования динамики состояний: | Цель 1. В Исправном состоянии (Perfect State) (АБ _{цель1}) Приемлемый Риск R _{ис} | Цель 2. В Неисправном состоянии (Imperfect State) (АБ _{цель2}) Приемлемый Риск R _{ни} | Цель 3. В неработоспособном состоянии (Down State) (АБ _{цель3}) Приемлемый Риск R _{нрс} | Цель 4. В Опасном состоянии (Hazardous State) (АБ _{цель4}) Приемлемый Риск R _{ос} |
| Научно-отраслевой уровень исследования: | Обоснование функциональных свойств , обеспечивающих назначение СТС | | | |
| | МДЗ-1.1. Исправное Состояние | МДЗ-1.2. Неисправное состояние | МДЗ-1.3. Неработоспособное состояние | МДЗ-1.4. Опасное состояние |
| | <i>ЭС_{1.1} ЭС_{1.N}; ВМ_{1.1}.... ВМ_{1.M}*</i> | | | |
| Уровень 1. Функциональный Аналитические Блоки (АБ ₁ (АБ _{1.1} (АБ _{1.1.1}))) (СТС (К Э)) | Обоснование технических свойств , обеспечивающих функциональные свойства | | | |
| | МДЗ-2.1. Исходное состояние | МДЗ-2.2. Допустимое состояние | МДЗ-2.3. Предельное состояние | МДЗ-2.4. Отказовое состояние |
| | <i>ЭС_{2.1} ЭС_{2.N}; ВМ_{2.1}....ВМ_{2.M}*</i> | | | |
| Уровень 2. Технический Аналитические Блоки (АБ ₂ (АБ _{2.1} (АБ _{2.1.1}))) (СТС (К Э)) | Обоснование физических свойств , обеспечивающих технические свойства | | | |
| | МДЗ-3.1. Фиксируемое состояние | МДЗ-3.2. Состояние допустимого повреждения | МДЗ-3.3. Состояние недопустимого повреждения | МДЗ-3.4. Состояние разрушения |
| | <i>ЭС_{3.1} ЭС_{3.N}; ВМ_{3.1}....ВМ_{3.M}*</i> | | | |
| Уровень 3. Физический Аналитические Блоки (АБ ₃ (АБ _{3.1} (АБ _{3.1.1}))) (СТС (К Э)) | Обоснование допустимых параметров механо-физико-химических процессов, обеспечивающих физические, технические и функциональные свойства | | | |
| | МДЗ-4.1. На субмикрорурвне | МДЗ-4.2. На микроуровне | МДЗ-4.3. На мезоуровне | МДЗ-4.4. На макроуровне |
| | <i>ЭС_{4.1} ЭС_{4.N}; ВМ_{4.1}....ВМ_{4.M}*</i> | | | |
| Уровень 4. Деградационных процессов Аналитические Блоки (АБ ₄ (АБ _{4.1} (АБ _{4.1.1}))) (СТС(К Э)) | Обоснование, предупредительных, контрольных и защитных мероприятий , направленных на обеспечение надёжности, живучести и безопасности | | | |
| | МДЗ-5.1. В Исправном состоянии | МДЗ-5.2. В Неисправном состоянии | МДЗ-5.3. В Неработоспособном состоянии | МДЗ-5.4. В Опасном состоянии |
| | <i>ЭС_{5.1} ЭС_{5.N}; ВМ_{5.1}....ВМ_{5.M}*</i> | | | |
| Уровень 5. Решений Аналитические Блоки (АБ ₅ (АБ _{5.1} (АБ _{5.1.1}))) (СТС (К Э)) | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Таблица 2

**Эвристическая трансдисциплинарная модель и Аналитические Блоки (АБ_{v,w}) обоснования свойств надежности, живучести и безопасности соответственно СТС, Компонентов-К и Элементов-Э на критической стадии деградации:
МДЗ- междисциплинарные задачи; ЭС- экспертные системы;
ВМ – вычислительные модули**

| Обосновать свойства надёжности, живучести и безопасности СТС, Компонентов и Элементов (первый иерархический уровень): | | | | |
|---|---|--|---|---|
| Цели исследования динамики состояний: | Цель 4. В Опасном состоянии (Hazardous State) (АБ _{цель4}) Приемлемый Риск R_{OC} | Цель 5. В состоянии Аварийной Ситуации (АС) (Emergency situation State) (АБ _{цель5}) Приемлемый Риск R_{AC} | Цель 6. В состоянии Аварии (Accident State) (АБ _{цель6}) Приемлемый Риск R_A | Цель 7. В состоянии ТЧС (Technogenic emergencies State) (АБ _{цель7}) Приемлемый Риск R_{ТЧС} |
| Научно-отраслевой уровень исследования: | | | | |
| Уровень 1. Функциональный <i>Аналитические Блоки</i> (АБ ₁ (АБ _{1.1} (АБ _{1.1.1}))) (СТС (К Э)) | Обоснование функциональных свойств , обеспечивающих назначение СТС | | | |
| | МДЗ-1.4. Опасное Состояние | МДЗ-1.5. Состояние АС | МДЗ-1.6. Состояние А | МДЗ-1.7. Состояние ТЧС |
| | <i>ЭС_{1.1}..... ЭС_{1.N} ; ВМ_{1.1}.... ВМ_{1.M}*</i> | | | |
| Уровень 2. Технический <i>Аналитические Блоки</i> (АБ ₂ (АБ _{2.1} (АБ _{2.1.1}))) (СТС (К Э)) | Обоснование технических свойств , обеспечивающих функциональные свойства | | | |
| | МДЗ-2.4. Отказовое состояние | МДЗ-2.5. Состояние Живучести | МДЗ-2.6. Состояние Защиты | МДЗ-2.7. Состояние локализации и ликвидации |
| | <i>ЭС_{2.1}..... ЭС_{2.N} ; ВМ_{2.1}....ВМ_{2.M}*</i> | | | |
| Уровень 3. Физический <i>Аналитические Блоки</i> (АБ ₃ (АБ _{3.1} (АБ _{3.1.1}))) (СТС (К Э)) | Обоснование физических свойств , обеспечивающих технические свойства | | | |
| | МДЗ-3.4. Состояние разрушения | МДЗ-3.5. Восстанавливаемое Состояние | МДЗ-3.6. Не Восстанавливаемое Состояние | МДЗ-3.7. Состояние Полномасштабного разрушения |
| | <i>ЭС_{3.1}..... ЭС_{3.N} ; ВМ_{3.1}....ВМ_{3.M}*</i> | | | |
| Уровень 4. Деградационных процессов <i>Аналитические Блоки</i> (АБ ₄ (АБ _{4.1} (АБ _{4.1.1}))) (СТС (К Э)) | Обоснование допустимых параметров механо-физико-химических процессов, обеспечивающих физические, технические и функциональные свойства | | | |
| | МДЗ-4.4. На макроуровне | МДЗ-4.5. На метауровне | МДЗ-4.6. На мегауровне | МДЗ-4.7. На гигауровне |
| | <i>ЭС_{4.1}..... ЭС_{4.N} ; ВМ_{4.1}....ВМ_{4.M}*</i> | | | |
| Уровень 5. Решений <i>Аналитические Блоки</i> (АБ ₅ (АБ _{5.1} (АБ _{5.1.1}))) (СТС (К Э)) | Обоснование, предупредительных, контрольных и защитных мероприятий , направленных на обеспечение надёжности, живучести и безопасности | | | |
| | МДЗ-5.4. В Опасном состоянии | МДЗ-5.5. В состоянии Аварийной С | МДЗ-5.6. В состоянии Аварии | МДЗ-5.7. В состоянии ТЧС |
| | <i>ЭС_{5.1}..... ЭС_{5.N} ; ВМ_{5.1}....ВМ_{5.M}*</i> | | | |

Суть предлагаемого принципа Самоорганизации – в использовании системы правил, представленных метаэвристиками и эвристиками, предписывающими область исследования и некоторую последовательность процесса обработки информации с целью поиска рациональных свойств объекта в зависимости от цели исследования и решаемой задачи. Процесс инициируется исходными данными, процедурами их обработки и экспериментальными данными для различных сочетаний воздействующих факторов и конструктивных свойств элементов (деталей).

Синтетическая модель принципа Самоорганизации (рис. 1) разработанная для автоматизированного/автоматического обоснования свойств СТС, Компонентов и Элементов (далее, объектов) включает последовательность процедур (рис. 2) соотношенную с иерархической структурой СТС (рис. 3) представленных этапами самоорганизации. На первом этапе обосновываются свойства СТС, на втором этапе – свойства Компонентов, на третьем – Элементов. Процедуры реализуются без внешнего управляющего воздействия. Активизация процедур происходит под воздействием исходных данных и промежуточных результатов, которые обрабатываются Метаэвристиками и Эвристиками, представляющими собой логические правила. Первые два уровня процедур представлены Метаэвристиками для последовательной Самоорганизации Задач и Аналитических блоков. Третий уровень – конечная процедура, выполняется Эвристиками, которые непосредственно формируют свойства объекта.

Назначение Метаэвристик специализировать и в то же время углубить пространство поиска знаний, в котором предположительно находится рациональное решение. Назначение эвристик непосредственно использовать знания для соотношения воздействующих на объект факторов и необходимых свойств объекта для обеспечения технических требований.

Процедуры реализуют иерархический механизм Самоорганизации в соответствии с которым, сначала, в зависимости от исходных данных, характеризующих объект исследования, Самоорганизуются задачи, решение которых необходимо для обоснования свойств.

Затем Самоорганизуются Аналитические блоки, включающие необходимые экспертные системы и вычислительные модули, необходимые для решения задач. И только затем, сформированные ранее задачи, представляются в виде исходных фактов, являющихся постановочной (левой) частью эвристик содержащихся в базе правил соответствующих экспертных систем, которые и Самоорганизует (формирует) свойства рассматриваемого объекта. Таким образом, процесс Самоорганизации синтезируется представленным механизмом в соответствии с исходными данными, целью каждого этапа и требуемыми свойствами рассматриваемого объекта в заданной системе ограничений (технических требований).

Исходные данные и задачи, решение которых обеспечивает искомые свойства, а также существующие методы их решения являются основой формирования Метаэвристик и Эвристик (правил), поэтапно обеспечивающих процесс Самоорганизации свойств. Метаэвристики и эвристики составляются экспертами предметных областей и включаются в базы знаний иерархического комплекса Экспертных Систем и Вычислительных модулей. Метаэвристики и эвристики могут формироваться и включаться непосредственно в процесс решения любыми экспертами. Правомерность их применения оценивается качеством полученных результатов после согласования с другими экспертами. Метаэвристики ограничивают область используемых эвристик при решении задач, но позволяют увеличить их количество для обеспечения глубины представления и обработки знаний при одновременной возможности объединения результатов эвристических решений.

Необходимо отметить, что для построения Метаэвристик и Эвристик, экспертами может использоваться информация, структурированная в соответствующей онтологии [35].

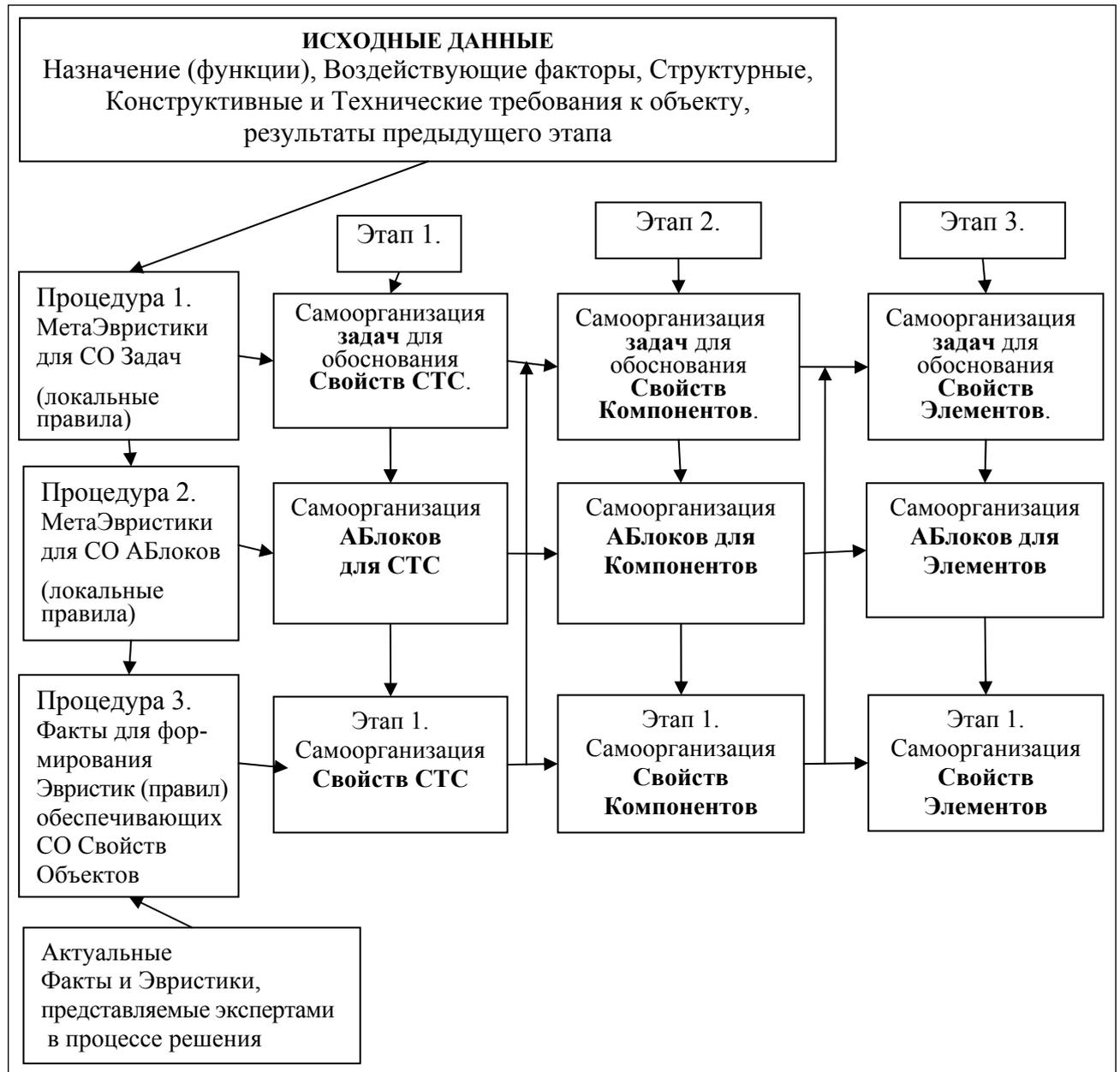


Рис. 1. Синтетическая модель принципа Самоорганизации (СО) свойств Сложной Технической системы (СТС), Компонентов и Элементов; Аналитический Блок (АБлок)

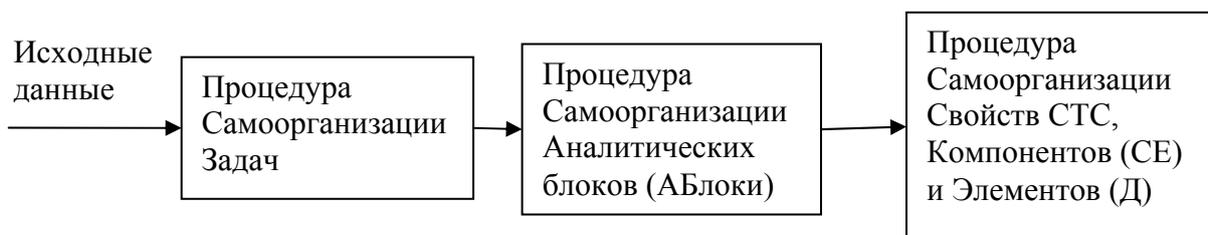


Рис. 2. Последовательность процесса Самоорганизации (СЕ- сборочные единицы, Д-детали)

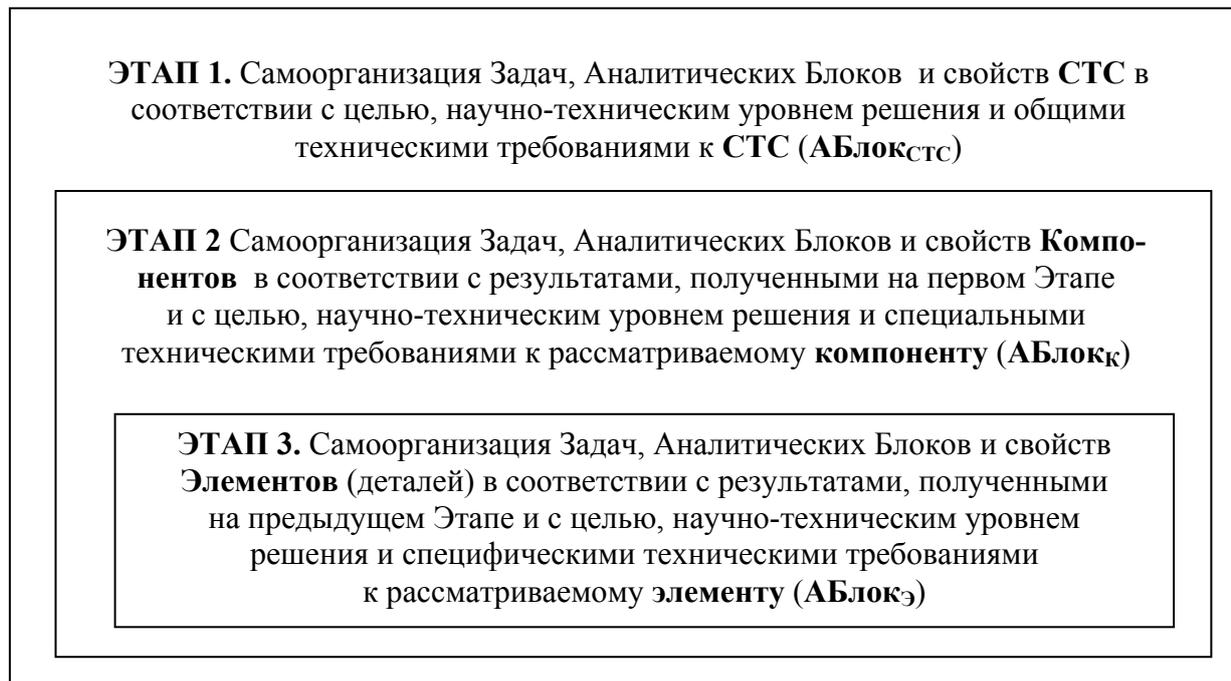


Рис. 3. Иерархия этапов самоорганизации свойств сложных технических систем (СТС), компонентов (К) и Элементов (Э)

Первый Иерархический Уровень включает Процедуру 1 (рис. 4), осуществляемую в соответствии с Метаэвристиками. Левая часть Метаэвристик содержит исходные данные, отражающие функциональное назначение исследуемого объекта, технические требования, стадию (цель), научно-отраслевой уровень, результаты предыдущей стадии, если они имеются. Правая часть Метаэвристик содержит совокупность задач для обоснования свойств СТС (Этап 1), Компонентов (Этап 2) и Элементов (Этап 3), в соответствии с исходными. Причем совокупность задач для СТС определяет совокупность задач для компонентов, а те, в свою очередь, зависимую совокупность задач для Элементов.

Второй Иерархический Уровень представлен Процедурой 2 (рис. 5) осуществляющей Самоорганизацию Аналитических Блоков (АБлоков) для всех этапов в соответствии с Метаэвристиками, левая часть которых включает совокупность задач, определенных на первой (предыдущей) процедуре для каждого этапа, а правая часть содержит перечень ЭС и ВМ обеспечивающих их решение.

Третий Иерархический Уровень представлен Процедурой 3 (рис. 6), которая непосредственно Самоорганизует (формирует) свойства объектов с помощью эвристик и расчетных моделей входящих в состав Экспертных Систем и Вычислительных Модулей включенных в Аналитические блоки на предыдущей процедуре. Эвристики (правила) в левой части содержат ту часть исходных данных, которые необходимы для обоснования того или иного свойства объекта, а в правой - непосредственно наименование и значение этого свойства.

Основными исходными данными для обеспечения свойств надежности, живучести и безопасности объектов являются воздействующие факторы, а также общие и специальные технические требования, ограничивающие допустимые параметры основных свойств.

Таким образом, при реализации совокупности процедур при обосновании свойств объекта, этапы выполняются в следующей последовательности. При выборе Этапа 1 (АБлок_{СТС}) (рис. 3), самоорганизуются (формируются) Экспертные системы и Вычисли-

тельные модули для обоснования свойств СТС, при выборе Этапа 2 (АБлок_к), самоорганизуются (формируются) Экспертные системы и Вычислительные модули для обоснования свойств компонентов. Для Этапа 3 (АБлок_э) самоорганизуются (формируются) Экспертные системы и Вычислительные модули для обоснования свойств элементов (Д). Каждый этап аналитического блока на основе выбранной стадии состояния (АБцель₁,... АБцель_М) и научно-отраслевого уровня описания свойств Уровень₁,... Уровень₅) обеспечивает обоснование свойств СТС (АБ₁), компонентов (сборочных единиц) (АБ_{1,1}) и элементов (деталей) (АБ_{1,1,1}) (табл. 1,2).

Теперь правила выбранных ЭС и модели ВМ должны обеспечить обоснование свойств надежности, живучести и безопасности СТС. Таким образом, непосредственное решение меж- и дисциплинарных задач осуществляется с помощью АБлоков, представляющих многоуровневый многокомпонентный комплекс, включающий экспертные системы и вычислительные модули.

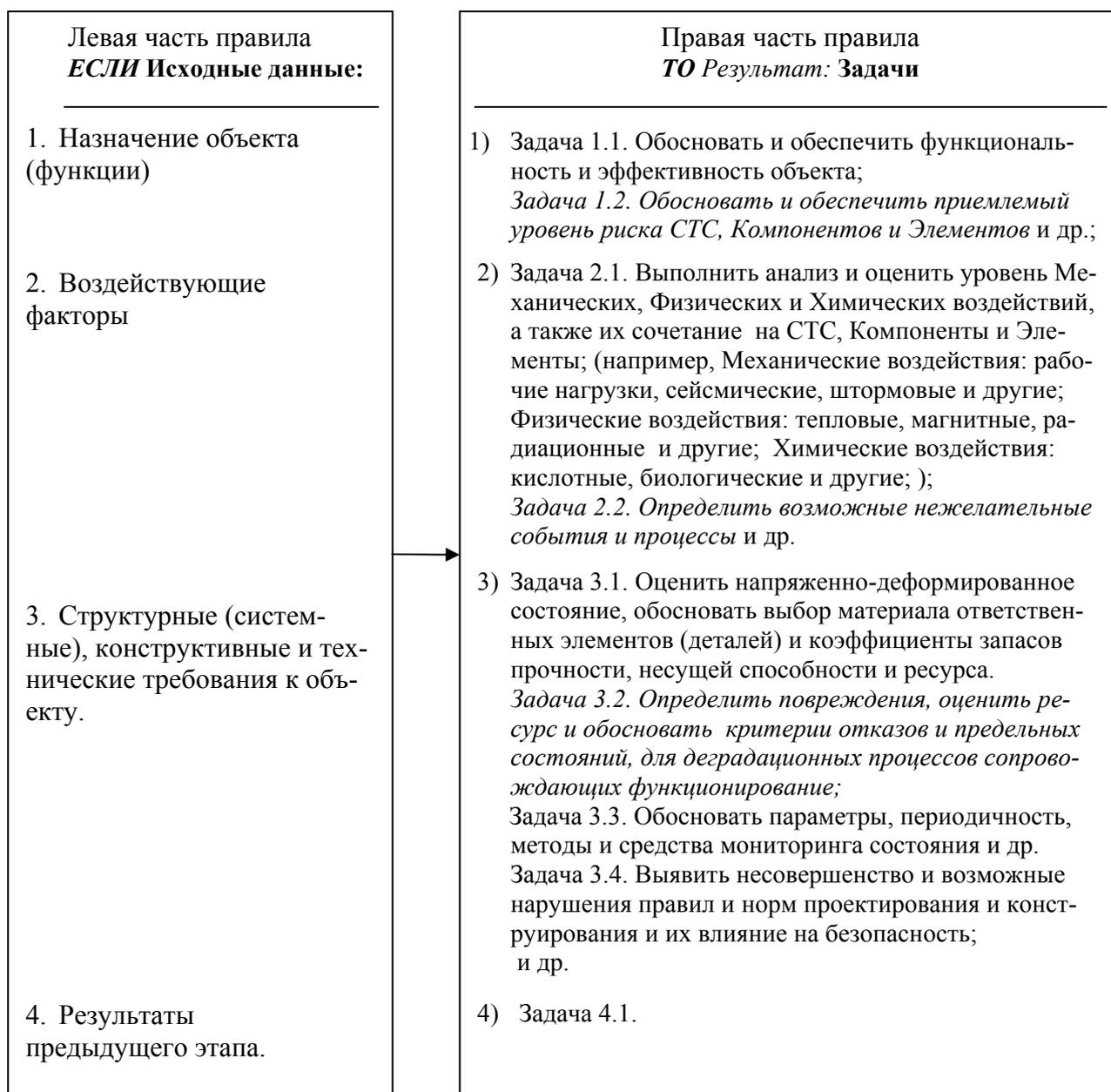


Рис. 4. Процедура 1. Метаэвристики Самоорганизации Задач (локальные метаправила)

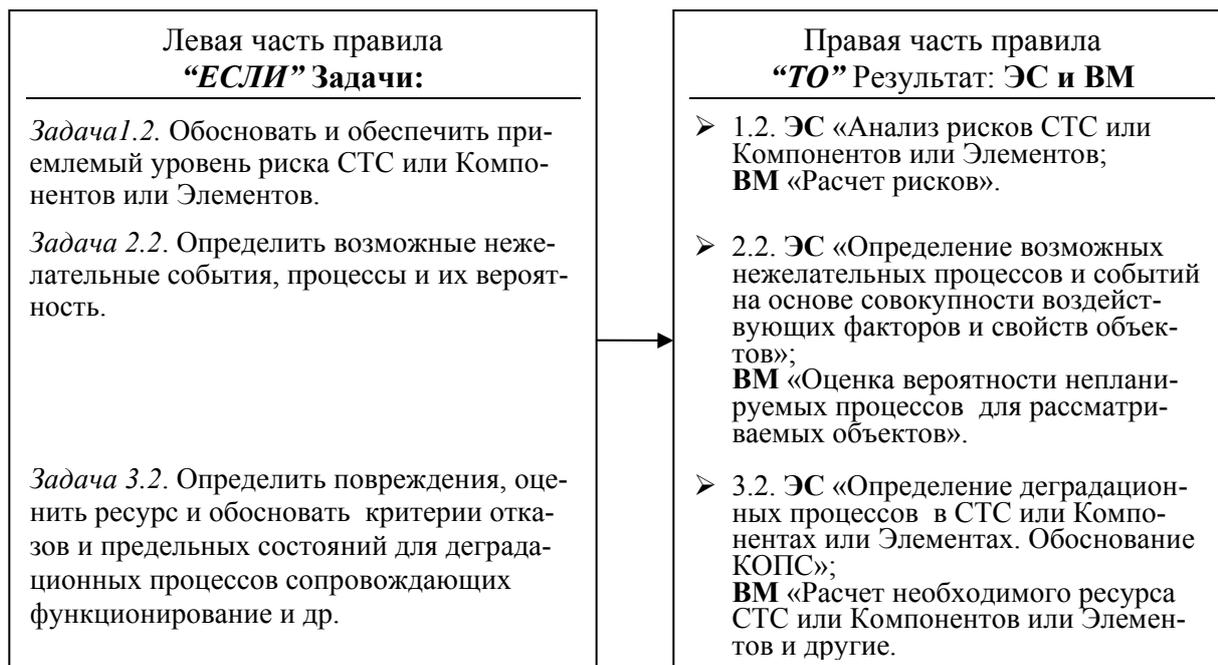


Рис. 5. Процедура 2. Метаэвристики для Самоорганизации Аналитических блоков, для задач, 1.2, 2.2 и 3.2: ЭС- экспертные системы; ВМ- вычислительные модули; КОПС – критерии отказов и предельных состояний

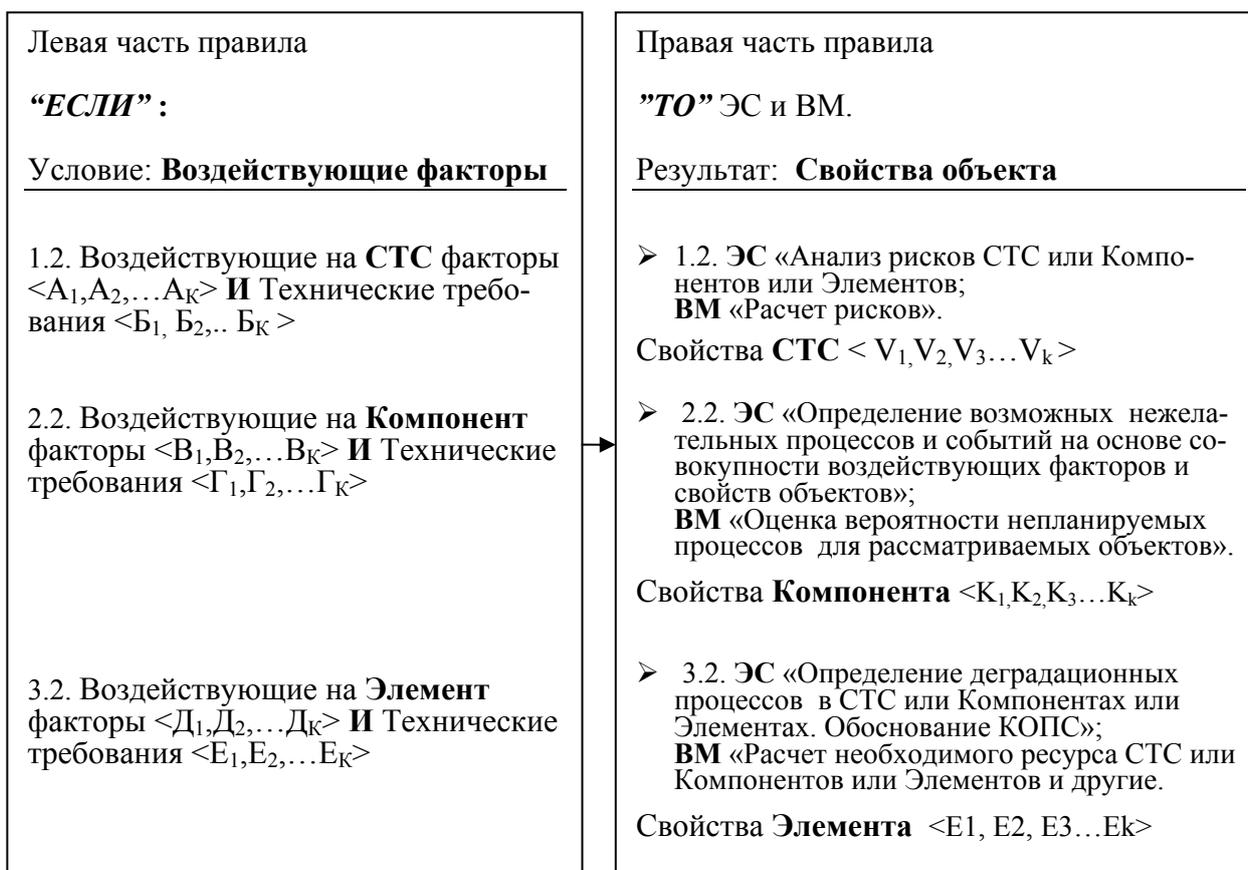


Рис. 6. Процедура 3. Эвристики для Самоорганизации свойств объектов: ЭС- экспертные системы; ВМ- вычислительные модули

Например, требуется обосновать свойства надежности, живучести и безопасности Сложной Технической Системы по производству полиэтилена при высоком давлении относящейся к нефтехимической отрасли. Исходными данными для обоснования требуемых свойств являются - *воздействующие факторы*: избыточное давление рабочей среды в аппаратуре до 250 МПа, проектная температура до 280⁰С; избыточное проектное давление вспомогательной водной среды до 300⁰С, механическая и химическая очистка воды, $8 < \rho H < 11$; *общие технические требования* – обеспечить приемлемую величину риска СТС в соответствии с действующими НТД, методы и средства мониторинга и диагностирования, требуемый ресурс.

Процедура 1, этап 1. МЭвристика, для самоорганизации **задач** обоснования свойств надежности, живучести и безопасности СТС записывается следующим образом: «**Если** проектируется «Химико-Технологическая Линия (ХТЛ) - Производство полиэтилена высокого давления производительностью 100000 т/год» **И** *воздействующие факторы* взрыво-пожароопасная среда этилен **И** избыточное проектное давление среды в аппаратуре до 250 МПа **И** проектная температура используемых сред до 300⁰С **И** необходимо обеспечить приемлемую величину риска в соответствии с действующими НТД **И** общие технические требования **ТО ЗАДАЧА** обосновать и обеспечить соответствующую частоту (вероятность) отказов различного происхождения и их последствия для СТС **И** распределить допускаемые риски катастрофических отказов между компонентами (сборочными единицами) СТС **И ЗАДАЧА** обосновать системы предупреждения и защиты СТС в случае катастрофического отказа любого компонента **И ЗАДАЧА** предупреждения вторичных отказов **И** другие ЗАДАЧИ.

Процедура 1, этап 2. МЭвристика, для самоорганизации **задач** обоснования свойств **Компонентов** записывается следующим образом: «**Если** (исходные данные те же) **И** специальные требования к рассматриваемому компоненту **ТО** Обосновать свойства каждого критического компонента для обеспечения частоты и последствий отказа каждого Компонента определенных на Этапе 1 **И ЗАДАЧА** обосновать системы предупреждения и защиты компонента в случае катастрофического отказа **И ЗАДАЧА** Обосновать требуемый ресурс компонентов **И** другие ЗАДАЧИ.

Процедура 1, этап 3. МЭвристика, для самоорганизации **задач** обоснования свойств **Элементов** записывается следующим образом: «**Если** (исходные данные те же) **И** специфические требования к рассматриваемому компоненту частота отказа и последствия отказа Элемента определены на Этапе 2 **ТО ЗАДАЧА** Обосновать допустимую частоту и последствия отказов критических элементов входящих в состав каждого критического компонента **И ЗАДАЧА** Обосновать требуемую несущую способность элементов **И ЗАДАЧА** Обосновать требуемый ресурс элементов **И** другие ЗАДАЧИ.

Процедура 2, Этап 1. Самоорганизация АБлоков. МЭвристика самоорганизации Аналитических Блоков (АБлоков) для решения задач определенных *процедурой 1 на этапе 1*: **ЕСЛИ ЗАДАЧА** обосновать соответствующую частоту (вероятность) отказов различного происхождения и их последствия для СТС **ТО** Включить в АБлок Экспертную Систему (ЭС) Анализа причин катастрофических отказов на подобных СТС **И** Включить в АБлок Вычислительный модуль (ВМ) расчета частоты отказов, их последствий и риска; **ЕСЛИ ЗАДАЧА** обосновать систему предупреждения и защиты СТС в случае катастрофического отказа любого компонента **ТО** Включить в АБлок Экспертную Систему (ЭС) анализа эффективности используемых систем предупреждения и защиты для каждого катастрофического отказа и обоснования требуемых систем защиты **И** Включить ВМ оценки эффективности систем защиты и т.д.

Процедура 3: ЕСЛИ исходные данные, необходимые для обоснования того или иного свойства объекта:

ТО Этап 1. Эвристика для СОрганизация свойств СТС: ЕСЛИ необходимо повысить ресурс живучести СТС *ТО* увеличить степень мониторинга параметров всех опасных компонентов (повышенное свойство контролепригодности) *И* обеспечить нейтрализацию опасных веществ при их истечении или выбросах (повышенное свойство защиты) *И* рассчитать частоту (вероятность) отказов СТС в при новых свойствах компонентов (повышенная точность прогноза безотказности).

ТО Этап 2. Эвристика для СОрганизация свойств Компонентов: ЕСЛИ необходимо повысить свойство ресурсной живучести Компонента *ТО* необходимо повысить ресурс критических элементов *И* обеспечить контролепригодность критических элементов *И* оценить вероятность отказа компонента из новых элементов и др.

ТО Этап 3 . Эвристика для СОрганизация свойств Элементов: ЕСЛИ необходимо повысить свойство прочностной и ресурсной надежности Элемента *ТО* Обосновать и обеспечить запасы несущей способности, прочности и ресурса по критериям механической прочности *ИЛИ (И)* механики разрушения *ИЛИ (И)* ползучести *ИЛИ (И)* коррозионной стойкости.

Для обоснования и обеспечения соответствующих свойств СТС, компонентов и элементов остальные процедуры и этапы выполняются по аналогии и базируются на соответствующих метаэвристиках и эвристиках являющихся основой экспертных систем [36] и вычислительных модулей входящих в состав АБлоков каждого этапа.

Приведенные примеры отражают реальность с некоторым приближением, но они позволяют понять суть предлагаемого принципа и модели самоорганизации свойств надежности, живучести и безопасности СТС, их компонентов и элементов.

Автоматическое формирование Задач, Аналитических Блоков (АБлок) и непосредственно свойств СТС, Компонентов и Элементов осуществляется в результате взаимодействия соответствующих процедур и этапов на основе предложенного принципа и модели самоорганизации. Сформулированные принципы СОрганизации задач и состава АБлоков образуют концепцию автоматической конфигурации интеллектуальной информационной системы для обоснования свойств в соответствии с выбранным объектом, целью и решаемыми задачами без специализированной системы управления. Модель и соответствующие ей процедуры решения задач формируются метаэвристиками и эвристиками. Это позволяет повысить качество и эффективность процесса обоснования свойств безопасности создаваемых СТС, существенно сократить время на разработку соответствующих интеллектуальных информационных систем и обеспечивать их динамическую модернизацию.

Разработанный метод позволяет исключить частые доработки интеллектуальной системы реализующей принцип Самоорганизации при возникновении новых знаний, которые могут быть включены в Базы Знаний и Данных экспертных систем и вычислительных модулей соответственно, без особых затруднений.

Новизна результатов в том, что Принцип Самоорганизации свойств надежности, живучести и безопасности СТС, обеспечивающих техногенную безопасность, представлен совокупностью эвристической иерархической Трансдисциплинарной Модели, Метаэвристических и Эвристических правил формирующих процедуры решения в зависимости от целей и задач составляющих Трансдисциплинарную модель. Принцип Самоорганизации обеспечивает взаимосвязь и обработку неформализованной междисциплинарной информации и представляет собой метод автоматизированного обоснования рациональных свойств техногенной безопасности.

Необходимо отметить, что рассмотрение динамики технического состояния позволяет повысить качество обоснования параметров мониторинга и диагностирования и, совме-

стно с другими свойствами надежности и безопасности, практически исключить катастрофические отказы. Информационные уровни обеспечивают представление и связь описания состояний знаниями различных предметных областях, что повышает качество решения Междисциплинарных задач, в том числе благодаря их лучшему пониманию экспертами и специалистами различных отраслей знаний для обеспечения коллективности решений. Формулировка междисциплинарных задач является результатом синтеза Дисциплинарных Задач.

Предлагаемый принцип и модель являются абстракциями обеспечивающими описание процесса самоорганизации свойств, разработку концепции многокомпонентной программной системы на основе принципов искусственного интеллекта для автоматической/автоматизированной обработки соответствующей информации и интеграции знаний экспертов. Необходимые свойства и их параметры, методы и средства их обеспечения, для снижения риска аварий, разрабатываются соответствующими экспертами и специалистами.

Заключение. Принцип самоорганизации свойств Сложных Технических Систем представлен синтезом эвристической иерархической трансдисциплинарной модели, метаэвристических и эвристических правил. Синтетическая модель представляет совокупность процедур обеспечивающих самоорганизацию свойств в зависимости от рассматриваемого объекта, стадии состояния объекта и научно-отраслевого аспекта описания состояний. Синтетическая модель принципа Самоорганизации включает Метаэвристики для формирования задач, Аналитических Блоков и Эвристики. Аналитические блоки обеспечивают решение междисциплинарных задач для каждого уровня иерархии: структурного, временного и научно-отраслевого. Непосредственное решение меж- и дисциплинарных задач, обеспечивающих обоснование требуемых свойств, осуществляется с помощью эвристик (эвристических правил) и аналитических моделей составляющих экспертные системы и вычислительные модули, входящие в состав аналитических блоков.

Разработку и согласование Метаэвристик и Эвристик, представляющих правила принятия решений, осуществляют соответствующие эксперты.

Сформулированный принцип и модель обеспечивают автоматический/автоматизированный процесс обоснования свойств в соответствии с исходными данными, целью и решаемыми задачами без специализированной системы управления. Любые изменения в исходной информации обеспечивают автоматическую/автоматизированную реконфигурацию процесса обработки информации.

Использование разработанного принципа может существенно повысить качество обоснования свойств объектов и соответственно понизить вероятность катастрофических отказов и аварий, благодаря использованию информации представленной в базах знаний и экспертами. Предложенный принцип и модель Самоорганизации могут дополняться и развиваться в соответствии с потребностями повышения надежности, живучести и безопасности СТС и применением новых подходов и идей.

Таким образом, сделана попытка разработать и использовать принцип Самоорганизации для решения задач в условиях недостаточно известных воздействующих факторов и конструктивных свойств элементов, в отсутствии аналитических моделей, отражающих закономерности изменения состояния объектов, когда имеющиеся знания могут быть представлены только в виде логических высказываний (правил).

Предложенный принцип и модель Самоорганизации свойств СТС, позволяют, при обосновании свойств объекта, учесть факторы, которые не были учтены заранее, как в логических, так и в аналитических моделях. Это обеспечивается гибкостью процесса и возможностью изменения участвующих в управлении структурных элементов процесса, представленных в виде эвристик (правил).

Главным инструментарием, реализующим предложенный принцип и модель самоорганизации с наименьшими затратами средств, можно считать производственные экспертные системы. Принцип Самоорганизации и представленные модели, совместно с подходом Model Drive Development для разработки производственных экспертных систем [37] и компонентным подходом при разработке интеллектуальных программных систем [38] образуют метод обеспечивающий взаимосвязь и взаимозависимость иерархических уровней знаний различных наук, существенно более высокий уровень согласования знаний (синтез знаний) различных научных дисциплин и выполнение междисциплинарных исследований для обеспечения техногенной безопасности в автоматизированном/автоматическом режиме.

Таким образом, самоорганизация для обоснования свойств СТС - это автоматизация, при которой управляющие воздействия осуществляются не системой управления, а формируются и реализуются в пределах объекта управления благодаря соответствующему взаимодействию его компонентов между собой и с исходными данными. Компоненты обладают некоторыми свойствами, позволяющими им устанавливать новые связи между собой и взаимодействовать так, чтобы достигать цели при изменении технического состояния объекта и его описании знаниями различных предметных областей.

Литература

1. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования / Новосибирск: Наука. - 2017. 724 с. ISBN: 978-5-02-038737-9.
2. Махутов Н.А., Резников Д.О. Многоуровневая оценка живучести сложных технических систем с учетом масштабно-структурной иерархии процессов накопления повреждений и разрушения // Безопасность в техносфере. - 2016. № 4. С. 3–17.
3. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности /М.: Наука. - 2008. 334 с. ISBN 978-5-02-032647-7.
4. Берман А.Ф. Дegrаdация механических систем. Отв.редактор Ю.М. Краковский. Новосибирск. Наука. - 1998. 320 с.
5. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Павлов А.И. Принципы информационной технологии решения междисциплинарных задач обеспечения техногенной безопасности на основе самоорганизации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. - 2019. № 2 (14). С. 5-15.
6. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Системные исследования чрезвычайных ситуаций. Абрахин С.И., Абросимов Н.В., Агеев А.И., Адушкин В.В., Акимов В.А., Алешин Н.П., Антоновская Г.Н., Артамонов В.С., Асмолов В.Г., Байда С.Е., Баранов В.В., Басанский Е.Г., Белов П.Г., Белолипецкий В.М., Беляев И.И., Берман А.Ф., Большаков А.М., Большов Л.А., Бурдаков Н.И., Бурова В.Н., Николайчук О.А. и др. Тематический блок "Национальная безопасность" /Москва. - 2015. Т. Системные исследования чрезвычайных ситуаций. 864 с.
7. Махутов Н.А. Критериальная база прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности машин и человеко-машинных комплексов // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2013. № 5. С. 25–36.
8. Махутов Н.А., Назолин А.Л. Диагностика состояний и обоснование безопасности турбогенераторов критически и стратегически важных энергоустановок // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2016. № 2. С. 3-24.
9. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Резников Д.О., Неганов Д.А.. Анализ напряженно-деформированных и предельных состояний в экстремально нагруженных зонах машин и конструкций // Чебышевский сборник. - 2017. Том 18. Выпуск 3. С. 390-412.
10. Махутов Н.А., Большаков А.М., Захарова М. И. Анализ риска аварий объектов нефтегазовой отрасли в арктических климатических условиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2019. Том 85. №2 С. 48-54.
11. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Доронин С.В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем // Вычислительные технологии. — 2009. Т. 14, № 6. С. 58-71.

12. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики: человек конструирующий себя и свое будущее. – Изд.2. - М.: Книжный дом «Либроком». - 2014. 264 с.
13. От моделей поведения к искусственному интеллекту /Под ред. В.Г. Редько. – М.: КомКнига. - 2006. 315 с.
14. Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Самоорганизация в мультиагентных системах // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010. Выпуск № 3. Том 104. С. 14-20.
15. Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В. Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. -М.: ИПИ РАН. - 2014. 189 с.
16. Кузнецова В.Л., Раков М.А. Самоорганизация в технических системах. Киев: Наукова думка. -1987.
17. Малинецкий Г.Г. Теория самоорганизации. На пороге IV парадигмы // Компьютерные исследования и моделирование. - 2013 Т. 5. № 3. С. 315–366.
18. Bernon C. Tools for Self-Organizing Applications Engineering/C. Bernon [et al.] // Series Lecture Notes in Artificial Intelligence. V. 2977 / Eds G. Di Marzo Serugendo. Springer. - 2004. P. 283–298.
19. Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. № 2. -М.: Наука. - 2012. С. 92–120.
20. Жевнерчук Д.В., Кондратьев В.В. Применение методов теории самоорганизации в задачах управления профилированием и конфигурированием вычислительных систем // Доклады академии наук. - 2014. Том 459. С. 409-412.
21. Куприянов М.С., Кочетков А.В. Мультиагентная модель самоорганизующейся распределенной системы // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2016. № 2. С. 12-17.
22. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Модель трансдисциплинарной задачи обоснования свойств техногенной безопасности // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2018. №6. С. 21-34.
23. Махутов Н.А., Берман А.Ф., Николайчук О.А. Некоторые принципы самоорганизации для управления риском техногенных катастроф // Проблемы анализа риска. -2015. Том 12. № 4. С. 34–45.
24. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И. Самоорганизующийся алгоритм формирования решений для обеспечения требуемого технического состояния сложных опасных объектов // Седьмая международная конференция «Системный анализ и информационные технологии», САИТ – 2017 (13-18 июня 2017 г., г. Светлогорск, Россия): Труды конференции. В 2-х т. – М: ИСА РАН. Т1. С. 377-384.
25. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Интеллектуальная информационная система анализа отказов //Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2012. № 4. С. 88-96.
26. Ботвина Л.Р. О пользе и трудностях междисциплинарных исследований // Физическая мезомеханика. - 2018. Том 21. №6. С.9-16.
27. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем: Пер. с англ. / Под ред. И.А. Ушакова. М.: Мир. - 1980. 604 с.
28. Ахо А.В., Хопкрофт Д., Ульман Д.Д. Структуры данных и алгоритмы. Издательский дом «Вильямс». - 2000. 384 с.
29. Скобцов Ю.А., Федоров Е.Е. Метаэвристики. Донецк: изд. «Ноулидж». - 2013. 426 с.
30. Латыпов Н.Н., Ёлкин С.В., Гаврилов Д.А. Инженерная эвристика / под.ред. А.А. Вассермана.-М.: Астрель. - 2012. 320 с.
31. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд.: Пер. с англ.– М.: «И.Д. Вильямс». - 2016.- 1408 с.
32. Цетлин М.Л. Замечание об игре конечного автомата с партнером, использующим смешанную стратегию. Докл. АН СССР. - 1963. Том 149. №1. С. 52-53.
33. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». - 2012. 240 с.
34. Владова А.Ю., Владов Ю.Р. Построение систем интеллектуального управления состоянием техногенных объектов. 2-е изд. М.: ООО "Вега-Инфо". - 2018. 173 с.

35. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю. Онтология надежности механических систем //Искусственный интеллект. - 2004. Институт проблем искусственного интеллекта НАН Украины (Донецк). № 3. С. 266-274.

36. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Кузнецов К.А.. Поддержка принятия решений на основе продукционного подхода при проведении экспертизы промышленной безопасности //Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2014. №11. С. 28-34.

37. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Технология создания продукционных экспертных систем на основе модельных трансформаций / Под. ред. О.А. Николайчук. – Новосибирск: СО РАН. - 2019. 144 с. ISBN 978-5-7692-1646-6. DOI: 10.15372/TECHNOLOGY2019DNO

38. Pavlov A.I., Stolbov A.B., Dorofeev A.S. The Workflow Component of the Knowledge-based Systems Development Platform // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings for the 2nd Scientific-practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems. - 2019, Vol. 2463. P. 47-58. <http://ceur-ws.org/Vol-2463/>

Сведения об авторе

Берман Александр Фишелевич, профессор, главный научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения РАН (ИДСТУ СО РАН МНИВО), эксперт РАН, председатель Иркутского отделения Российского научного общества анализа риска, 664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134, тел.: 8(3952)453039, 8(914)8925548, e-mail: bafbam@mail.ru

УДК: 551.345; 519.816

DOI: 10.36535/0869-4176-2020-04-2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НАЛЕДЕЙ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Кандидат технических наук **Г.П. Стручкова**, **Н.С. Шеин**,
кандидат физ.-мат. наук **Т.А. Капитонова**

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Одним из негативных инженерно-геокриологическим процессов, оказывающих воздействие на нефтегазопроводы, проложенные в криолитозоне наряду с термокарстом, пучением, эрозией, солифлюкциями, заболоченностью, наличием подземных льдов и т.д. является наледеобразование и сопутствующие ему негативные процессы. Подобные воздействия приводят к тому, что в суровых климатических условиях напряженно-деформированное состояние металла трубопровода испытывает значительной степени изменения, что обуславливает предъявление повышенных требований к материалам, конструкциям и технологиям прокладки трубопроводных сетей.