Н.П. Кириллов

Концептуальная модель объекта ситуационного управления функциональными состояниями технических систем[1]

Аннотация. Моделирование процессов управляемого функционирования технических систем (ТС) связано с необходимостью решения проблем инженерии знаний. Упростить их решение можно за счет использования моделей-прототипов, в качестве которых предлагается применить концептуальные модели процессов управления и функционирования ТС. Обосновывается метод решения проблемы выявления общих свойств упомянутых процессов. Он основан на использовании возможностей выделения в ТС всего несколько видов функциональных частей, одна из которых, обязательная для всех систем, выполняет функции объекта ситуационного управления. На основе анализа общих особенностей процессов управляемого функционирования различных ТС предложена отражающая их оригинальная трехуровневая модель причинно-следственных процессов. Обоснованы свойства элементов и структуры этой модели, ее формализованные описания.

Ключевые слова: технические системы, модели и моделирование технических систем, свойства технических систем, инженерия знаний, моделе-ориентированная системная инженерия.

Введение

Ситуационное управление – это наиболее перспективный метод для решения задач управления функциональными состояниями [2] технических систем (ТС) в реальном масштабе времени (РМВ). Он предполагает использование заранее подготовленных сценариев «ситуация → решение» (ситуационных моделей — СМ), которые затем выбираются субъектом управления ТС в соответствии с текущими ситуациями. Если при этом решена задача оперативной идентификации ситуаций, то выбор решений можно будет осуществлять практически мгновенно.

Однако для управления процессами функционирования ТС, где ошибки или задержки в принятии решений могут привести к существенным негативным последствиям для самих систем, для окружающей среды и для которых наиболее актуально решение проблемы управления в РМВ, построение СМ в большинстве случаев оказывается неразрешимой задачей. В первую очередь это обусловлено сложностью решения неформализуемых творческих задач:

– целенаправленного поиска и отбора в исходных описаниях ТС необходимых знаний (информации) для их отражения в СМ;

– систематизации знаний о составных частях ТС и отражении их в смысловых понятиях, в базисе которых будут затем построены модели (состояниях, режимах, целях, программах, командах управления, и т.п.);

– структуризации знаний о составных частях и ТС в целом для последующего представления их в виде структурированных формализованных моделей.

Это задачи из области инженерии знаний (ИЗ). Необходимость в их решении объективно возникает на начальном этапе жизненного цикла формализованных концептуальных СМ, необходимых для разработки программного обеспечения автоматизированных и автоматических

[1] Исследования выполнены при поддержке РФФИ (гранты №№ 11-08-00641-а, 11-08-1016-а).

[2] Функциональное состояние – это устойчивая и равновесная фаза процессов функционирования технических систем и устройств, находясь в которой они выполняют одну из целевых функций, предусмотренных их конструкцией.

систем управления состояниями ТС, экспертных и обучающих систем, а также для составления формализованных инструкций пользователям ТС.

Современные методологии моделирования, например, моделе-ориентированная системная инженерия (model-based systems engineering — MBSE) [1, 2], разъясняют, *что и почему* надо делать для решения таких задач, но не объясняют, *как* их решать в конкретных предметных областях, в том числе для моделирования ТС. В существующих технологиях моделирования также нет средств и методов решения этих задач, они позволяют только упростить решение задач представления и документирования формируемых и сформированных знаний в заданном виде.

Сегодня решение перечисленных задач осуществляется только эмпирическими и эвристическими способами и относится к категории ИСКУССТВО. В результате качество моделей существенно зависит от многих негативных субъективных факторов, в процессе моделирования отсутствует уверенность в получении гарантированного результата, трудно оценить полноту и правильность построенных таким образом СМ. Совокупность этих факторов во многих случаях приводит к отказу от моделирования, а решение задач управления состояниями ТС полностью остается за человеком-оператором.

Таким образом, можно констатировать, что существует актуальная проблема перевода процессов решения указанных задач из категории ИСКУССТВО в категорию ТЕХНОЛОГИЯ, разработки методологии, методов и технологической поддержки формирования СМ.

В технической кибернетике процесс управления рассматривается как процесс взаимодействия, по крайней мере, двух объектов: субъекта и объекта управления (СУ и ОУ). Предметом обсуждения в этой статье является объект ситуационного управления функциональными состояниями ТС, а целью — обоснование принципов построения его концептуальных моделей на начальном уровне анализа общих системных свойств этого объекта и возможных применений этих концептуальных моделей (КМ).

1. Замысел решения проблемы

Одним из наиболее результативных методов упрощения процессов решения творческих задач является использование метода прототипов [3]. Применительно к рассматриваемой проблеме в качестве таких прототипов предлагается использовать концептуальные модели (КМ) процессов функционирования и управления состояниями гипотетической ТС (в дальнейшем — процессов управления ТС), которые должны отражать закономерности и свойства всех или, по крайней мере, какой-то совокупности технических систем, для которых актуально решение задач.

КМ — это компактное систематизированное и структурированное описание свойств предметной области, позволяющее упростить понимание присущих ей закономерностей, знание которых необходимо для решения *конкретных задач* целевого использования объекта моделирования. В описании КМ используются идеальные объекты и отношения, а также логика рассуждений с этими сущностями.

В данном случае целевое назначение КМ заключается в использовании их в качестве прототипа для упрощения решения задач ИЗ при моделировании процессов управления ТС. Очевидно, что степень этого «упрощения» будет находиться в прямой зависимости от состава и степени детализации свойств КМ. Это обстоятельство обусловливает проблему выбора или построения КМ, которые с одной стороны, должны отражать общие свойства процессов управления ТС, а с другой, — обеспечить существенное упрощение решения рассматриваемых задач. Здесь проявляется очевидное противоречие: чем большему количеству разных ТС будет соответствовать КМ, тем меньше будет результативность ее практического использования, и, наоборот. Однако в любом случае, для разрешения этого противоречия необходимо сначала построить КМ *начального уровня*, в которой должны быть учтены общие свойства ТС, и которую затем можно было бы детализировать путем конкретизации ее отдельных свойств, отражающих специфику тех или иных совокупностей ТС.

Поиск в обозримых тематических источниках готовых КМ технических систем, которые бы удовлетворяли указанным выше требованиям, не дал положительных результатов. Объяснение этому простое — существующие КМ разрабатывались для других целей.

В публикациях, непосредственно посвященных вопросам концептуального моделирования ТС, обзор которых приведен в [4], фактически не затрагиваются вопросы их управления. В

работах, ориентированных на описание КМ современных систем управления (интеллектуальных систем), в том числе ситуационного управления, например, в [5-7], наоборот, не детализируются в требуемой степени свойства объектов управления ТС.

Проблема разработки КМ, удовлетворяющей заданным целям применения и требованиям, оказалась многоаспектной, состоящей из нескольких логически и семантически взаимосвязанных между собой задач. Для их решения требуется, по сути дела, решить перечисленные выше проблемные задачи ИЗ, только уже применительно к некоторой гипотетической ТС (ГТС), свойства процессов управления состояниями которой (общие для реальных ТС) надо еще каким-то образом обосновать.

2. Общие свойства ТС

Основные источники знаний и информации о ТС — это конструкторская документация и эксперты. Совокупность свойств ТС, знания которых, по мнению разработчиков систем, необходимы для решения задач управления состояниями, содержится в инструкциях по эксплуатации. В них приведены сведения о конструкции, принципе действия, характеристиках (свойствах) системы, ее составных частях, а также правила правильной и безопасной эксплуатации (управления) и оценок технических (функциональных) состояний [8]. Поэтому выявление общих свойств ТС целесообразно осуществлять в таких инструкциях. Их анализ позволяет сделать вывод, что ТС присущи следующие общие свойства:

1) наличие условий штатной эксплуатации (УШЭ), которые включают описания параметрических характеристик:

– состояний окружающей среды (среды функционирования ТС);

– интервала времени, на котором гарантируется штатная эксплуатация системы;

– энергетических ресурсов (топливо, электроэнергия и пр.), потребляемых системой в процессе функционирования;

– ресурсов, обеспечивающих работоспособность системы (масла, смазки и пр.);

2) целевое назначение, которому соответствует конечное число функций, самостоятельно выполняемых системой в УШЭ (собственных функций):

– каждая функция выполняется при соответствующих ей устойчивых и равновесных фазах процесса функционирования системы (функциональных состояниях);

– в каждом таком состоянии система может находиться конечный интервал времени, зависящий от особенностей ее конструкции и/или состояния ресурсов;

3) функциональные состояния системы всегда могут быть однозначно представлены в виде совокупности параметров, характеризующих процессы функционирования элементов системы;

4) конструкцию, которая состоит из конечного числа элементов (устройств и деталей), взаимодействующих между собой известным образом, предусмотренным разработчиками системы для выполнения ее функций. Разным функциям может соответствовать разные структуры взаимодействия ее элементов;

5) одно или более устройств, которые специально предназначены для восприятия управляющих воздействий (УВ), изменяющих характеристики процессов функционирования системы. В дальнейшем такие устройства будем называть сенсорными элементами;

6) способность преопределенным образом изменять свои функции за предусмотренные интервалы времени в соответствии с последовательностями УВ, которые могут формироваться вовне и /или в самой системе, поступающими в определенном порядке на ее сенсорные элементы;

7) целевое применение в операционном окружении (при взаимодействии с другими объектами в среде), которое выражается в описании параметрических характеристик условий и функций применения (прикладного использования) системы. Необходимым условием выполнения функции применения является выполнение одной из соответствующих ей собственной функции ТС.

Важной особенностью для моделирования процессов управления ТС является наличие потенциальных возможностей получения фактически любых требуемых для этого знаний, а также параметрических описаний процессов функционирования системы и ее элементов. Они содержатся в конструкторской документации. Дополнительные знания можно получить у экспертов. Ограничения в возможностях наблюдения процессов функционирования ТС проявляются в

процессе их эксплуатации, когда наблюдаются только специально выбранные для этого измеряемые параметры. Выбор таких параметров (разработка программ телеизмерений) представляет собой самостоятельную проблему.

Будем полагать в дальнейшем, что перечисленные свойства ТС — это свойства ГТС.

3. Метод концептуального моделирования

Перечисленные свойства ТС, за исключением свойства 4, — это функциональные аспекты рассмотрения систем, непосредственно связанные с их конструкцией. ГТС — мыслимая система, в которой необходимо каким-то образом отразить на общем системном уровне закономерности, связанные с конструкцией реальных систем.

Для установления наглядных связей между функциями и средствами реализации, а также для построения их иерархий часто используется «модель Гамбургера» [9]. Пример такой модели показан на Рис. 1.

Необходимо отметить, что слово «функция» не обязательно означает математическое понятие. В инженерном деле оно имеет пять разных смысловых интерпретаций [10]:

– подтипа активности - процесса или события;

– какой-то сущности в определенной роли или сделанной для определенной роли;

– самой роли сущности, обычно в физической вещи, которую эта вещь играет в активности;

– указания на связь, например корреляция между какими-то аспектами процесса (если высота растет, то давление падает);

– математическое отношение между числовыми объектами, определяющее их соотнесение.

В модели Гамбургера рассматриваются модули — «функция → средство реализации» и связи между ними, которые также представлены в виде модулей ($К_{1i}$). Слово «функция» здесь может иметь разные смысловые значения, выбираемые в зависимости от контекста применения модели. Эта модель удобна в использовании при целостном рассмотрении особенностей и закономерностей конструкции и функций реальных систем, где определена структура, конкретизированы элементы и выполняемые ими функции.

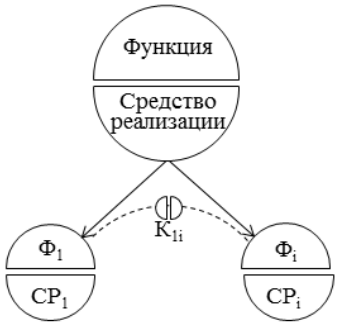


Рис. 1. Пример «модели Гамбургера»

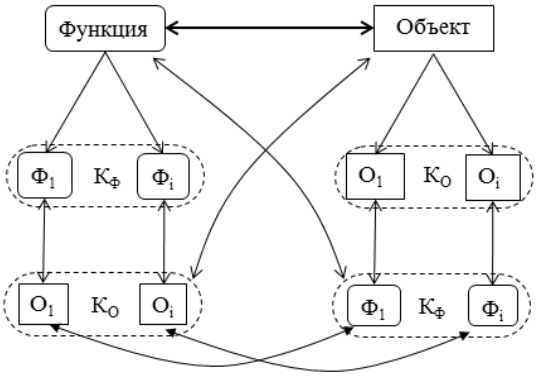


Рис. 2. Иллюстрация метода совместного структурно-функционального и объектно-ориентированного анализа сложных функциональных систем

При разработке концептуальных моделей ГТС такие знания надо выявлять в процессе анализа соответствующих закономерностей. Для этого целесообразно попеременно использовать все имеющиеся методы анализа систем и процессов их функционирования, по мере получения новых знаний о функциях (назначении) предмета исследования или о его объектном составе.

Для решения задач построения КМ предлагается специальный метод выявления и анализа функциональных и объектных закономерностей и структур сложных функциональных систем, основанный на совмещении методов структурно-функционального и объектно-ориентированного анализа и моделирования.

Суть предлагаемого метода концептуального моделирования заключается в следующем (Рис.2).

Вводится понятие «функциональный объект» — мыслимый образ материального объекта, которому приписывается некоторая ролевая сущность — функция. Примеры функциональ-

ных объектов (ФО): широко используемые в кибернетике и теории систем понятия «объект управления», «субъект управления», блоки в блок-схемах разрабатываемой или существующей конструкции ТС. Одному и тому же ФО (его функции) сопоставляется множество разнообразных способов и средств технической реализации.

Использование этого понятия позволяет рассматривать мыслимые образы как материальные объекты — системы и их части, на уровне целевого назначения, абстрагируясь от специфики и разнообразия конструкции систем. В этом смысле ФО — это черный ящик, выполняющий приписанную ему ролевую сущность.

Если его функцию для заданных целей использования, например, переходы в пространстве состояний, можно представить в воспринимаемом потребителем формализованном виде, то нет необходимости в дальнейшей детализации свойств этого объекта. В противном случае возникает необходимость в декомпозиции ФО и его функции. Ограничения в восприятии одновременно нескольких событий или атрибутов моделей известно как число Миллера — 7±2 [11], которое можно использовать в качестве критерия оценки необходимости в дальнейшей декомпозиции моделей.

В дальнейшем, для определенности смыслового содержания понятий, элементы функции, полученные в результате декомпозиции, будем называть компонентами, а элементы функционального объекта — функциональными частями.

Между функциональным объектом и выполняемой им функцией устанавливается взаимнооднозначное соответствие. Если в процессе анализа предметной области получены дополнительные знания о возможности декомпозиции функции, то выполняется ее структурно-функциональный анализ. Компонентам функции ($Ф_1$ - $Ф_i$), полученным по его результатам, взаимно-однозначно сопоставляются новые функциональные объекты ($О_1$ - $О_i$) состав, свойства и структура взаимосвязей которых приписываются исходному ФО. Выявленные связи между компонентами функции и частями объекта обозначены на Рис. 2 в виде контуров $К_Ф$ и $К_О$. При выполнении объектно-ориентированного анализа, наоборот, сначала детализируются свойства объекта, а затем определяются функции, выполняемые его частями.

Предложенный метод может использоваться также при анализе и моделировании реальных функциональных объектов, в частности, ТС. В этом случае вместо абстрактного функционального объекта надо будет рассматривать конкретную систему.

4. Модель автономной интеллектуальной технической системы

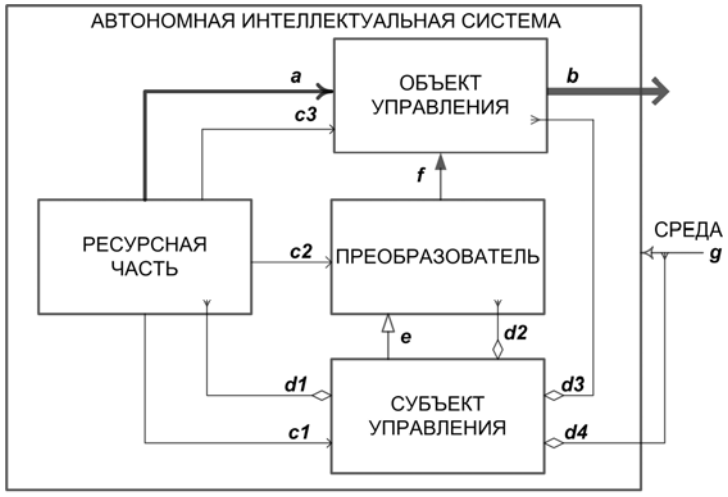
Существующее разнообразие ТС обусловливает и разнообразие их функциональных частей (ФЧ). Это делает проблематичным решение задачи выявления совокупности общих ФЧ, которые можно было бы использовать для сравнения и оценки ТС. Однако ее решение станет возможным, если сначала определить базовую совокупность функциональных частей некоторого абстрактного ФО, которые в различных сочетаниях могли бы рассматриваться как ФЧ реальных ТС. В этом случае задача сводиться к построению модели ГТС, имеющей такие свойства.

В соответствии с принятой в системной инженерии последовательностью моделирования [12] необходимо сначала установить функциональные границы ГТС — входы, выходы, среду функционирования и объекты операционного окружения, с которыми предполагается его взаимодействие. Но здесь тоже возникает большое разнообразие вариантов. При этом выбор любого из них трудно обосновать с общесистемных позиций: он может отражать закономерности свойственные одним системам, но не соответствовать другим ТС.

Для решения этой задачи предлагается рассматривать ГТС как автономную интеллектуальную систему, все функции которой, от формирования целей, до получения и использования результатов работы, реализуются в ней самой, и которая не имеет операционного окружения, взаимодействуя только со средой. Объектная модель такой ГТС представлена на Рис. 3.

В модели ГТС использованы пять ФЧ: субъект управления (СУ), преобразователь (ПР), объект управления (ОУ), ресурсная и коммутационная части (РЧ и КЧ), которым предписаны следующие функции:

РЧ — обеспечивает другие функциональные части ГТС ресурсами, необходимыми для их работы. В состав ресурсов входят также ресур-



Элементы коммутационной части:

a - преобразуемые ресурсы (объекты)

b - результаты преобразования

c - энергетические и обеспечивающие ресурсы

d - значения контролируемых параметров

e – решения, принятые СУ

f - управляющие воздействия

g - воздействия среды

Рис.3. Объектная модель автономной интеллектуальной системы

сы, преобразуемые ОУ (связь ***a***) в результат (выход ***b***) функционирования системы.

ОУ — это та часть системы, которая *непосредственно* выполняет ее целевые (потребительские) функции — преобразование материальных ресурсов (веществ, энергии, полей) в требуемый результат. ОУ выполняет эти функции в УШЭ систем при нахождении в определенных функциональных состояниях (далее — состояниях). Изменение состояний осуществляется путем оказания на ОУ управляющих воздействий (УВ) материальной природы, поступающих от ПР. Сущность процессов функционирования ОУ — преобразование материи.

СУ — это часть системы, которая выполняет функции принятия решений по управлению ОУ, в том числе формирования целей управления и оценки результатов их выполнения. Для решения этих задач в СУ предусмотрено четыре входа (связи ***d1 – d4***), по которым поступает информация о значениях наблюдаемых параметров, характеризующих процессы функционирования ОУ, ПР, РЧ и состояния среды. Выход СУ — это сформированное им управленческое решение на перевод ОУ в требуемое состояние (связь ***e***). Сущность процессов функционирования СУ — преобразование информации.

ПР — преобразовывает *информацию* об управленческом решении СУ в управляющие *воздействия* на ОУ. То есть ПР осуществляет переход от информационных аспектов управления к материальной сущности процессов функционирования ОУ.

КЧ — это совокупность всех связей между другими ФЧ, представленных в модели системы.

Существенной особенностью модели, отличающей ее от традиционных концептуальных представлений процессов управления, является включение в нее *преобразователя*, через который СУ осуществляет управление состояниями ОУ. Использование ПР в модели позволяет в явном виде разделить предметную сущность процессов функционирования СУ (преобразование информации) и ОУ (преобразование материи) и отразить функцию перевода информации (решений, принимаемых СУ) в материальные воздействия — УВ, оказываемые на ОУ.

Совокупность ФЧ в предложенной модели ГТС, несмотря на достаточно поверхностное описание выполняемых ими функций, позволяет выявлять факты наличия или отсутствия таких ФЧ в реальных ТС и на этом основании осуществлять предварительную классификацию и сравнение систем. Для этого требуется соотнести функции,

выполняемые элементами конструкции ТС с функциями частей модели ГТС. Это позволяет сравнивать ТС по наличию или отсутствию у них тех или иных ФЧ ГТС: встроенных ресурсных подсистем и типов ресурсов (перерабатываемых, энергетических, обеспечивающих), элементов, выполняющих функции СУ (системы управления или ее подсистем), преобразователя, информационных связей функциональных частей со встроенными и внешними объектами, выполняющими функции СУ.

Следует особо отметить, что *в любой ТС всегда существует совокупность элементов конструкции, выполняющая функцию объекта управления модели ГТС*. Кроме того, в случаях, когда речь идет о характеристиках потребительских функций ТС, то под этим следует понимать свойства состояний объекта управления в ТС, а не других его ФЧ.

Предложенная модель ГТС не противоречит положениям кибернетики, теории систем и известным физическим законам функционирования технических систем. Расширить прикладные возможности модели ГТС можно путем детализации свойств и функций, составляющих ее частей.

5. Модели объекта и процессов ситуационного управления

При обсуждении функций ТС следует различать *внешние функции*, выполняемые системами в процессе применения в среде и в операционном окружении в соответствии с целями их пользователей, и *собственные функции* ТС, которые предусмотрены их конструкцией и могут *самостоятельно* выполняться, находясь в состояниях, предусмотренных их создателями [7].

Например, внешние функции самолета заключается в его пространственных перемещениях в воздушной среде, в соответствии с целями летчика. Собственные функции — в предопределенном изменении функциональных состояний подсистем (режимов работы двигателей, положения рулевых поверхностей) в соответствии с оказываемыми на них управляющими воздействиями, которые инициируются целями полета, формируемыми летчиком или автопилотом. При этом одни и те же характеристики движения самолета в воздушном пространстве в ряде случаев могут быть осуществлены при разных комбинациях состояний (собственных функций) его подсистем.

Так как нас интересуют вопросы моделирования процессов управления собственными функциями (функциональными состояниями) ТС, то требуется решить задачу их выделения в модели ГТС.

Из сказанного следует, что функции ГТС можно разделить на потребительские (внешние) и собственные. При этом для выполнения потребительских функций необходимым (но не всегда достаточным) условием является реализация соответствующих им собственных функций ГТС. Из этого в свою очередь следует, что каждой из этих функций можно сопоставить собственный слой (уровень) управления, а ему — соответствующие СУ, ПР и ОУ, с учетом того обстоятельства, что цели управления собственными функциями ГТС формируются субъектом управления внешними функциями. Модель, полученная при таком разделении функций, показана на Рис.4.

Контур управления внешними функциями ГТС образуют СУ1, ОУ1 и преобразователь **A**. Контур управления собственными функциями системы образуют СУ2, ОУ2 и преобразователь цели управления функциональными состояниями ГТС в воздействии **B**.

Логика взаимодействия атрибутов модели состоит в следующем. СУ1 формирует потребность в применении ГТС, которая заключается в изменения функции (параметрических характеристик) преобразования входных объектов в выход ОУ1, выполняемой в данный момент времени, или — в сохранении ее характеристик на определенном интервале времени. Эта потребность интерпретируется как проблемная ситуация: <функция, выполняемая ОУ1 → функция ОУ1, удовлетворяющая потребности СУ1>. Для этой ситуации СУ1 выбирает решение, реализация которого должна изменить требуемым образом функцию, выполняемую ОУ1 в данный момент времени.

Необходимым условием для выполнения такого преобразования является перевод ОУ2 в одно из удовлетворяющих ему состояний и поддержание в нем соответствующей фазы функционирования объекта на заданном интервале времени. Совокупность состояний ОУ2, каждое из которых удовлетворяет этому условию, рассматривается СУ1 как подмножество одноцелевых состояний ОУ2 и используется им в качест-

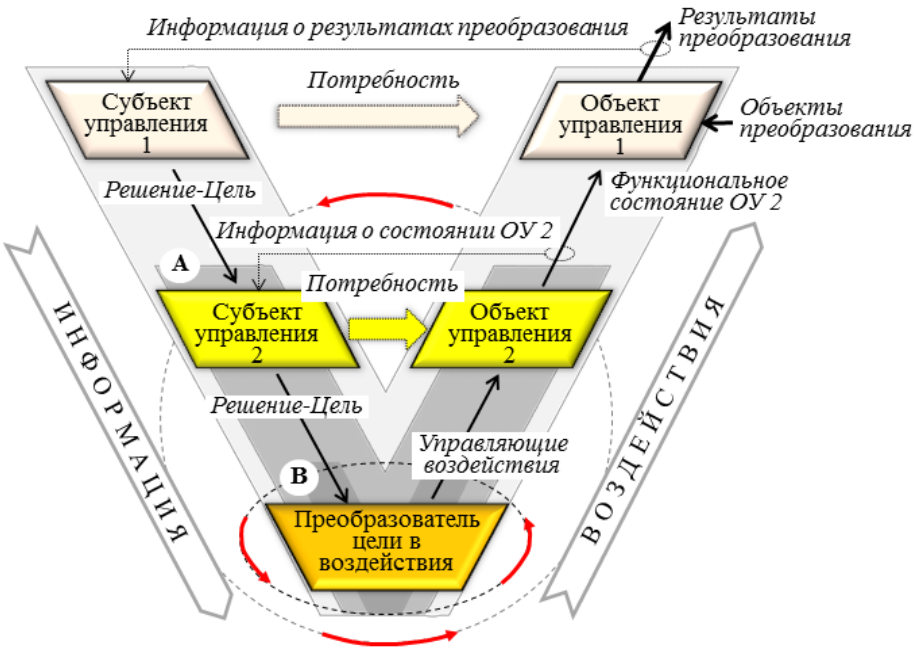


Рис. 4. Решение задачи разделения внешних и собственных функций технических систем

ве решения ситуационной задачи, которое СУ2 интерпретируется как цель управления ОУ2.

Состав функций, выполняемых СУ2, зависит от ситуаций, возможных в процессе управления ГТС [13]:

1) перевод ОУ2 в новое состояние в соответствии с решением СУ1 - целью для СУ2;

2) поддержание ОУ2 в целевом состоянии на заданном интервале времени;

3) принятие решений на реконфигурацию структуры ОУ2 для выполнения заданной цели, в случае невозможности ее выполнения при исходной структуре и при наличии возможностей ее реконфигурации (структурной и/или функциональной избыточности);

4) принятие решений, направленных на сохранение целостности ТС и экономию потребляемых ресурсов, при выявлении некорректируемых нештатных ситуаций.

Детализация функций СУ2 в каждой из перечисленных ситуаций — задача структурно-функционального анализа, решение которой выходит за рамки рассматриваемых здесь вопросов.

Для понимания логической сущности предложенной модели перечислим тут только функции, которые СУ2 выполняет в первой ситуации в условиях штатной эксплуатации ГТС:

– идентификация (определение) текущего состояния ОУ2 с заданной периодичностью;

– выбор целевого состояния из множества одноцелевых состояний, в которое будет осуществляться перевод ОУ2 (конкретизация цели);

– выбор решения для ситуации: <текущее состояние ОУ2 → целевое состояние ОУ2>, которое представляет собой указание (приказ, команду) на выполнение требуемых изменений состояний ОУ2;

– передача информации о выбранном решении преобразователю.

ПР осуществляет преобразование полученной информации о решении в последовательность управляющих воздействий на ОУ2. Состав и структура этих последовательностей определяются двумя факторами: составом и структурой функциональных частей ОУ2; решаемой ситуацией — <текущее состояние ОУ2 → целевое состояние ОУ2>.

В одних случаях для перевода ОУ2 в целевое состояние может потребоваться реализация некоторой совокупности УВ, осуществляемой в последовательно-параллельном порядке, в других — всего лишь одно УВ.

ОУ2 изменяет свое состояние в соответствии с поступившей на него последовательностью УВ. Такие последовательности рассматриваются в качестве непосредственных причин предопределенных изменений состояний ОУ2, осуществляемых за определенные промежутки времени. Это обстоятельство можно рассмат-

ривать как выполнение условия причинности поведения объекта, что обусловливает возможность формализованного представления процессов функционирования ОУ2 в виде классических моделей динамических систем [14]. Перевод ОУ2 в требуемое (целевое) состояние завершает описание цикла управления процессами его функционирования.

Предложенный вариант решения задачи разделения внешних и собственных функций процессов управления ФО позволяет детализировать концептуальную двухуровневую модель управления состояниями функциональных систем, предложенную академиком Анохиным П.К. [15], которая до настоящего времени используется для концептуального описания кибернетических систем [16]. Основные отличия в описанной здесь модели процессов управления состояниями ФО заключаются в том, что каждому субъекту управления, в их иерархическом представлении, сопоставляется собственный объект и задачи управления. В явном виде разделяются информационные процессы, где используются абстрактные образы реальности, от процессов материальных преобразований, а связь между ними делегируется преобразователю информации в материальные воздействия на ОУ2.

6. Унифицированная модель контура управления

Отметим, что модель управления собственными функциями ГТС — это модель преобразователя **A** в контуре управления внешними функциями системы (Рис. 4). Это означает, что использование ПР в качестве модели функциональной части ГТС, помимо четкого разделения информационных и материальных процессов, позволяет представлять и описывать внешние и вложенные контуры управления состояниями функциональных частей ОУ в ГТС в виде унифицированного модельного модуля (Рис. 5). При этом описание свойств такого модуля может быть использовано для описания всех выделяемых контуров управления состояниями функциональных частей объекта управления ГТС.

Для выполнения своих функций в условиях штатной эксплуатации (фиксированных характеристик интервала времени жизни ТС, ресурсного обеспечения и воздействий среды) СУ должен использовать, по крайней мере, четыре

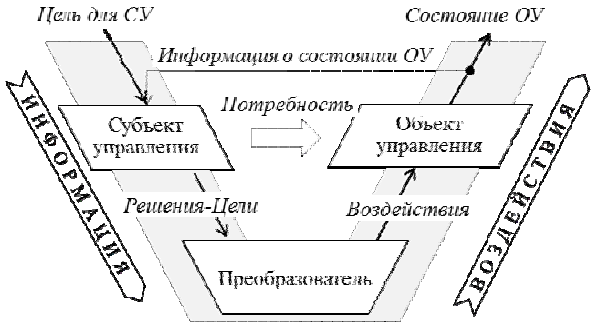


Рис. 5. Унифицированная модель контура управления функциональным объектом

модельных представлений процессов функционирования и управления ОУ:

1) Ситуационная модель для оперативной оценки достижимости целей потребителей в управлении состояниями ОУ. Представим ее в виде взаимно однозначного отображения:

$$\varepsilon : Q \times Q \to K \times \Delta T, \qquad (1)$$

где Q — множество целей управления состояниями ОУ, K — множество одношаговых ситуационных решений, ΔT — множество интервалов дискретного времени, отражающих задержки в изменении ситуации после передачи решения преобразователю для реализации.

Запись $\varepsilon(q, q') = (k, \Delta t)$ означает, что для достижения новой цели функционирования ОУ (разрешения ситуации $< q \to q' >$) существует решение k, после реализации которого следует ожидать это событие в интервале времени $\Delta t = (t, t']$, после передачи решения преобразователю, где t и t' — промежутки времени, отсчитываемые от момента передачи решения.

2) Модель идентификации целевых состояний, которую представим в виде отображения:

$$\beta : C \to Q, \qquad (2)$$

где C — множество состояний модели функционирования ОУ.

Необходимо отметить, что понятие «состояние» — это атрибут не объекта, а его модели — абстрактного (мыслимого) образа процессов функционирования ОУ. Состояние — это семантическое понятие, которое характеризует некоторые устойчивые равновесные фазы этих процессов, которые выполняются при определенных условиях функционирования ОУ (УШЭ ГТС). Их можно представлять разными

пространствами состояний, отличающихся по степени детализации\обобщения параметрического описания процессов функционирования ОУ, — стратами. Выбор страты (степени детализации параметрического пространства состояний) осуществляется исходя из целей использования модели ОУ. Решение задачи выбора страты описания процессов функционирования ОУ предложено в [14].

3) Модель идентификации состояний ОУ по значениям наблюдаемых параметров функционирования представим в виде отображения:

$$\alpha : X \to C, \tag{3}$$

где X — множество векторов значений параметров состояния ОУ.

4) Модель процессов функционирования ОУ в пространстве состояний, предназначенная для использования существующих *возможностей* детерминированного управления переходами в пространстве состояний ОУ и решения задачи контроля (отслеживания) этих переходов. Представим ее в виде отображения

$$\varphi : C \times R \times \Delta T \to C, \tag{4}$$

где R — множество управляющих решений, каждому из которых соответствует единственный одношаговый переход в пространстве состояний ОУ, а ΔT — множество интервалов дискретного времени, отражающих задержки в реакции ОУ на управляющие воздействия, соответствующие решениям из множества R.

Запись $\varphi(c, r, \Delta t) = c'$ означает, что если ОУ находится в состоянии c, то при реализации решения r он должен будет в интервале времени $\Delta t = (t, t']$ перейти в состояние c', где t и t' — промежутки времени, отсчитываемые от момента завершения управляющего воздействия, соответствующего этому решению. Предложенное формализованное представление модели φ соответствует традиционному описанию моделей переходов в пространстве состояний дискретных стационарных динамических систем.

Отметим, что каждому решению $r_i \in R$ можно однозначно сопоставить интервал времени — $\Delta t_i \in \Delta T$, в паре с которым они используются в (4). Это обстоятельство выразим в виде отображения:

$$\omega : R \to \Delta T. \tag{5}$$

Потребности в управлении процессами функционирования ОУ, учитываемые в модели (1), должны быть согласованы с *возможностями* управляемых изменений его состояний, представленных в модели (4). Связь между множеством решений K (множеством одношаговых переходов во множестве целей) и множеством решений на осуществление одношаговых переходов в модели пространства состояний ОУ — R, заключается в необходимости существования инъективного отображения

$$\lambda : K \to R^*, \tag{6}$$

которое взаимно однозначно сопоставляет каждому элементу $k_i \in K$ элемент r_i^* из множества транзитивных замыканий одношаговых переходов в пространстве состояний ОУ — R^*.

Очевидно, что, используя модель (4), всегда можно построить модель φ^*, отражающую конечный результат изменения состояний ОУ при реализации последовательности решений из множества R^*, которую представим в виде отображения:

$$\varphi^* : C \times R^* \times \Delta T \to C. \tag{7}$$

Смысловая интерпретация этой модели аналогична модели (4) за исключением того, что вместо одношаговых переходов в пространстве состояний ОУ в ней используются их транзитивные замыкания.

Из сказанного выше следует, что между моделями ε (1) и φ^* (7) существует логическая связь:

$$\varepsilon(q, q') = (k, \Delta t) \Rightarrow \forall c (c \in \beta^{-1} q) \exists \Delta t' (\Delta t' \subset \Delta t) \times \\ \times \varphi^*(c, \lambda k, \Delta t') \subset \beta^{-1} q' \tag{8}$$

Условие (8) означает, что все ситуационные решения, определяющие возможности изменения целей управления ОУ, должны быть интерпретированы в виде соответствующих им последовательностей одношаговых переходов в пространстве состояний модели функционирования ОУ. При этом выбор ситуаций и решений, представленных в модели ε, определяет выбор подмножества состояний и переходов между ними в моделях функционирования ОУ — φ и φ^*. Очевидно, что при выполнении условия (8), модель ε представляет собой гомоморфный образ моделей φ и φ^*.

Отметим, что модель одношаговых переходов в пространстве состояний ОУ — φ всегда

можно представить в виде ситуационной модели, как взаимно однозначное отображение

$$\pi : C \times C \to R \times \Delta T, \qquad (9)$$

для которого справедливо утверждение:

$$[\pi(c,c') = (r,\Delta t) \Leftrightarrow \varphi(c,r,\Delta t) = c'] = И. \qquad (10)$$

Использование модели (9), в отличие от моделей (4) и (7), позволяет непосредственно интерпретировать каждую целевую ситуацию $< q \to q' >$ в виде конечной последовательности изменения ситуаций в соответствии с ходом реализации процесса управления состояниями ОУ, вида: $< c_1 \to c_2 >,...,< c_{n-1} \to c_n >$, где $c_1 \in \beta^{-1} q$, $c_n \in \beta^{-1} q'$, а n — число ситуаций в последовательности.

Соответствие между множеством решений R и множеством совокупностей (последовательно-параллельных цепочек) УВ — U , допустимых для управления ОУ, осуществляется ПР. Используемую им модель представим в виде отображения:

$$\gamma : R \to U. \qquad (11)$$

Модели $\varepsilon, \varphi, \varphi^*$ и π допускают визуальное представление в виде ориентированных размеченных графов. Модели α , β , γ и ω удобно представлять в виде таблиц или деревьев решений [17].

Можно показать, что совокупности этих моделей достаточно для определения:

– последовательностей ситуационных решений, реализация которых должна обеспечить перевод ОУ из текущего состояния в одно из одноцелевых состояний, соответствующих заданной цели управления;

– последовательности изменения состояний и ситуаций функционирования ОУ в соответствии с ходом последовательной реализации этих решений;

– интервалов времени, в течение которых ожидаются требуемые изменения состояний ОУ в процессе ситуационного управления.

7. Функциональные слои модели объекта управления

Далее будем рассматривать процессы управления собственными функциями ГТС, используя терминологию унифицированной модели, представленной на Рис. 5.

Для построения моделей объекта управления ТС с обозримым числом состояний, ситуаций, ситуационных решений и наблюдаемых параметров, информации об универсальной модели процессов управления состояниями ОУ возможно будет достаточно, для того чтобы результативно использовать ее в качестве прототипа. Однако в большинстве случаев число таких атрибутов моделей может существенно превышать возможности их восприятия, т.е. число Миллера. Это обстоятельство обусловливает необходимость в декомпозиции ОУ и выполняемых им функций.

Анализ конструкторской документации ТС позволяет выделить три уровня семантических и параметрических описаний процессов управления состояниями ОУ в этих системах:

1) описание собственных функций (целевого назначения, функциональных состояний) ОУ и допустимых последовательностей их изменения;

2) описание режимов функционирования ОУ (состояний), при нахождении в которых он выполняет собственные функции системы;

3) описание состояний сенсорных элементов (выключателей, переключателей, задвижек, заслонок, датчиков и т.п.), через которые осуществляются воздействия на ОУ, и правил допустимых последовательностей управляющих воздействий, выполнение которых должно приводить к требуемым изменениям режимов работы ОУ.

Такие трехуровневые описания процессов функционирования характерны фактически для всех ТС, как сложных, так и простых. Приведем пример такого описания для простой системы — карманного фонаря: собственная функция — излучать свет; режим функционирования — нагретая до определенной температуры нить накаливания в лампочке; сенсорный элемент — выключатель, который имеет два состояния «включен»\«выключен», его функция — замыкать\размыкать электрическую цепь.

Каждый из перечисленных уровней описания будем рассматривать как отдельный слой модели ОУ (Рис. 6):

– первый слой отражает процессы управления собственными функциями ОУ;

– второй слой — процессы управления режимами ОУ. Он отражает процессы функционирования преобразователя первого слоя;

Рис. 6. Функциональные слои объекта управления в ГТС

– третий слой — процессы управления состояниями сенсорных элементов ОУ. Он отражает процессы функционирования преобразователя второго слоя.

Объекты управления в каждом из этих слоев можно рассматривать как функциональные части объекта управления ГТС. Для определенности используемых понятий присвоим им собственные названия:

– ОУ первого слоя — исполнительная часть (ИЧ), состояния ИЧ — функциональные состояния (функции) ОУ;

– ОУ второго слоя — обеспечивающая часть (ОЧ), состояния ОЧ — режимы работы ОУ;

– ОУ третьего слоя — сенсорная часть (СЧ) ОУ, состояния СЧ — совокупность состояний ее элементов (СЭ).

Послойное разделение задач управления состояниями ОУ ГТС имеет аналогию с предложенной Дж. Саридисом трехуровневой иерархической моделью управления интеллектуальными системами, в которой он выделяет стратегический, тактический и исполнительный уровни [18]. Трехуровневая модель таких процессов обсуждается также в [6]. Однако эти модели не были привязаны к функциональным частям ОУ в системах, как это предложено здесь.

Иерархическая модель процессов управления функциональными состояниями частей ОУ (состояниями СЧ, режимами ОЧ и функциями ИЧ) показана на Рис.7.

Каждой цели для $СУ_{Сч}$ соответствует подмножество одноцелевых состояний ИЧ (функций ОУ), цели для $СУ_{Оч}$ — подмножество одноцелевых состояний ОЧ, для $СУ_{Сч}$ — подмножество одноцелевых состояний СЧ, решению $СУ_{Сч}$ — последовательность команд управления (КУ) состояниями сенсорных элементов, составляющих СЧ.

Команда управления состояниями сенсорного элемента — это семантическое понятие, смысловое содержание которого имеет смысл указания на осуществление безусловного перехода СЭ в заданное этой командой состояние.

Простейший вариант функции ПР — преобразование сигнальной информации в УВ. В этом случае информация, которая содержится в сигнале, взаимно однозначно отражается в параметрических характеристиках его материального носителя. При управлении реальными ТС функции ПР могут оказаться достаточно сложными. Например, при управлении с земли состояниями бортовых систем космических аппаратов функции ПР (передача команд управления) реализуют сложные командно-измерительные наземные системы. Но это обстоятельство не мешает построению моделей функциональных частей объектов управления в космических аппаратах. Предложенная трехслойная модель позволяет объяснить, почему можно это сделать.

Отметим, что задачу управления ОУ в ГТС в описываемом варианте можно рассматривать как задачу управления его функциональными состояниями или как задачу управления собственными функциями системы. Это означает, что первый уровень предложенной модели можно рассматривать в качестве модели для формирования требований к разрабатываемым моделям процессов функционирования и управления ТС. На этом уровне описания содержится обобщающая информация о выполняемых системой функциях и возможностях их изменения, на основании которой можно осуществлять обоснованный выбор состава функций и переходов между ними, которые необходимо будет затем детализировать на других уровнях иерархической модели процессов управления состояниями функциональных

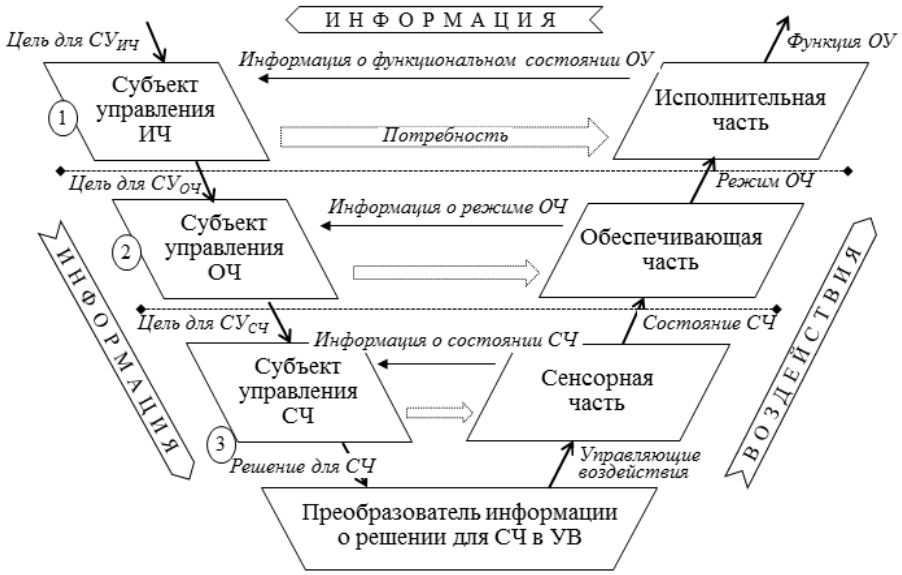


Рис. 7. Иерархическая модель слоев и процессов управления состояниями функциональных частей объекта управления в ГТС

частей ОУ системы. При этом по сути дела, определяются и требования к автоматизации этих процессов — выбирается совокупность ситуационных решений, процессы принятия которых подлежат автоматизации.

Еще одним полезным свойством модели является возможность предварительной оценки степени автоматизации функций субъектов управления функциональными частями объектов управления в ТС, т.е. — уровней их интеллектуализации [6]. Автоматизация этих функций может осуществляться как отдельно, на каждом слое модели, так на всех слоях одновременно.

Заключение

Изложенный подход к построению концептуальных моделей объектов ситуационного управления в технических системах не противоречит существующим методам анализа и моделирования сложных систем и процессов, а также их существующим КМ. Предложенные модели достаточно легко интерпретируются при описании процессов функционирования и управления состояниями реальных ТС.

Как указывалось ранее, — это концептуальные модели *начального уровня* описания свойств процессов ситуационного управления ОУ в ТС. Эти модели позволяют объяснить принципы и методы:

– выделения в ТС *объекта ситуационного управления*. В известных автору публикациях по тематике управления ТС наличие такого объекта в явном виде до сих пор не оговаривалось, а именно он и является предметом моделирования для построения средств реализации СУ;

– разделения внешних (потребительских) и внутренних (собственных) функций ТС. Предложенное здесь решение этой задачи воспринимается как очевидное. Однако в практике моделирования процессов управления и функционирования ТС системные аналитики (инженеры по знаниям, системные инженеры) достаточно часто эти функции не разделяют. В результате существенно усложняются процессы построения СМ: разнообразие возможностей применения систем (внешних функций) на много больше разнообразия выполняемых ими собственных функций. Попытки построения СМ путем формализации (алгоритмизации) внешних функций ТС чаще всего заканчиваюся неудачей;

– разделения информационных процессов принятия ситуационных решений от процессов функционирования ОУ, основанных на преобразованиях материи, которые отражаются в семантических моделях, используемых СУ. Это, в частности, позволяет привязать СМ к целям управления ОУ в ТС, а, следовательно, определить принципы и методы выбора содержания и степени детализации отражения процессов функционирования ОУ в этих моделях — стратах;

– построения трехслойной модели ОУ в ТС. Разделение этих слоев в модели позволяет конкретизировать свойства причинно-следственных процессов функционирования ТС, а, значит, упростить процессы построения СМ — здесь используется принцип декомпозиции сложных процессов и функциональных объектов на более простые. Существенным аспектом в этой модели является разделение объекта управления на функциональные части — ИЧ, ОЧ и СЧ, сопоставление им собственных СУ и «преобразователей» информации о принимаемых решениях;

– описания свойств взаимоотношений между СМ и модели процессов функционирования ОУ;

– обоснования состава и структуры унифицированной модели, посредством которой можно описывать слои модели процессов функционирования ОУ.

Обоснован метод анализа и моделирования сложных функциональных объектов (систем), основанный на совмещении методов структурно-функционального и объектно-ориентированного анализа и моделирования. В отличие от модели «Гамбургера» в нем четко определены принципы переходов от одного метода к другому. В изложенном материале использовалась только объектно-ориентированная ветвь этого метода, так как это было удобно делать применительно к рассмотрению свойств ОУ в ТС. Анализ свойств СУ удобнее будет производить методами структурно-функционального анализа.

Дальнейшая детализация свойств, предложенной КМ, заключается в конкретизации структуры унифицированной модели применительно к каждому слою КМ процессов функционирования ОУ в ТС. Детализация структур второго и третьего слоев этой модели предложена в [19,20]. С помощью этих моделей можно также конкретизировать области применения и назначение существующих концептуальных моделей ТС. Например, в [5] обсуждаются вопросы концептуального моделирования функций СУ в унифицированной КМ (Рис. 5), в [7] – вопросы концептуального моделирования экспертной системы, предназначенной для реализации функций, выполняемых СУ1 и СУ2 в модели, показанной на Рис. 4. В этом смысле дальнейшая детализация свойств предложенных моделей может позволить решить проблему систематизации результатов исследований и методов решения различных задач, связанных с тематикой управления ТС. Ее решение чрезвычайно актуально в практике моделирования. Это позволит определить по выявленным свойствам ТС те методы и методики построения СМ, которые в наибольшей степени подходят к решению конкретной задачи. Систематизация и структурирование знаний об имеющихся методах и приемах моделирования отдельных, специфических ТС позволит упростить поиск и переиспользование наработанного опыта предшественников.

Выявленные свойства объектов управления в ТС позволяют конкретизировать задачи их дальнейших исследований для практического использования КМ в качестве моделей-прототипов при решении задач инженерии знаний. Для этого, в частности, необходимо детализировать функции, выполняемые субъектами управления в каждом слое модели, в том числе принятие решений в нештатных ситуациях, а также особенности состава и структур функциональных частей объекта управления в ГТС.

Литература

1. SYSTEMS ENGINEERING VISION 2020. Technical Operations International Council on Systems Engineering (INCOSE) \\ http://www.incose.org/ProductsPubs/pdf/SEVision2020_20071003_v2_03.pdf (Электронный ресурс).
2. Jeff A. Estefan. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies \\ http://www.omgsysml.org/MBSE_Methodology_Survey_RevB.pdf (Электронный ресурс).
3. Солсо Р. Когнитивная психология. СПб.: Питер, 2006.
4. Кириллов Н.П. Концептуальные модели технических систем с управляемыми состояниями (обзор и анализ) // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011, №4.
5. Осипов Г.С. Динамические интеллектуальные системы // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008, №1.
6. Интеллектуальные системы управления. Под. Ред. Макарова И.М. и Лохина В.М. М.: Физматлит, 2001. 287 с.
7. Федунов Б.Е. Базовая алгоритмическая оболочка бортовых оперативно советующих экспертных систем типовых ситуаций функционирования антропометрического объекта // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2009. Т. 48. № 5. С. 752-764.
8. ГОСТ 2.601-95. ЕСКД. Эксплуатационные документы.
9. Wim Gielingh. A theory for the modelling of complex and dynamic systems // http://15926.info/functional-physical-object/GARM-paper.pdf (Электронный ресурс)

10. Gellish. A Generic Extensible Ontological Language. Design and Application of a Universal Data Structure // http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:de26132b-6f03-41b9-b882-c74b7e34a07d/its_renssen_20050914.pdf (Электронный ресурс).
11. Miller G.A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two. // The Psychological Review, 1956, vol. 63, P. 81-97.
12. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.
13. Кириллов Н.П. Классификация и моделирование нештатных ситуаций процессов управляемого функционирования технических систем // Пятый Белорусский космический конгресс: Материалы конгресса. Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2011. Т. 1. С. 182–186.
14. Кириллов Н.П. Функциональное состояние технического объекта. Дефиниция понятия // Авиакосмическое приборостроение. 2010, №10. С.31-40.
15. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем // Принципы системной организации функций. М.: Наука, 1973. С. 5 – 61.
16. Dubberly H., Haque U., Pangaro P. What is interaction? Are there different types? // http://www.dubberly.com/articles/what-is-interaction.html. 2009 (Электронный ресурс).
17. Хамби Э. Программирование таблиц решений. М.: Мир, 1976. 85 с.
18. Saridis G.N. Hierarchically intelligent machine. World Scientific Pub., Singapore, 2001. 126 p.
19. Кириллов Н.П. Репрезентативная модель объекта управления технических систем (часть I) // Авиакосмическое приборостроение. 2009, №10. С. 25-30.
20. Кириллов Н.П. Репрезентативная модель объекта управления технических систем (часть II) // Авиакосмическое приборостроение. 2009, №10. С. 31-37.

Кириллов Николай Петрович. Старший научный сотрудник СПИИРАН. Окончил Военную инженерную академию им. А.Ф. Можайского в 1975 году. Кандидат технических наук. Автор более 100 научных публикаций. Область научных интересов: систематизация и структуризация знаний о процессах управления и функционирования технических систем. E-mail: knp@mail.ru