

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УПРАВЛЯЕМОГО ПОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. П. Кириллов

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

СПИИРАН, 14-я линия ВО, д. 39, Санкт-Петербург, 199178

<kirill@spiiras.nw.ru>

УДК 681.5

Кириллов Н. П. Структурно-функциональная модель причинно-следственных закономерностей управляемого поведения технических систем // Труды СПИИРАН. Вып. 5. — СПб.: Наука, 2007.

Аннотация. Сформулированы общесистемные требования, предъявляемые к моделям функционирования и правилам управления состояниями технических систем (ТС). Выявлены типовые особенности исходных описаний ТС, затрудняющие построение моделей. Предложена структурно-функциональная модель процессов управляемого поведения ТС в виде IDEF0 диаграммы, позволяющая наглядно представить и проанализировать закономерности их причинно-следственных связей с общесистемных позиций. Детализация свойств этой модели позволяет обосновать и разработать общесистемные методы формализации и структуризации фрагментарных вербальных описаний правил управления и функционирования ТС. — Библ. 10 назв.

UDC 681.5

Kirillov N. P. The skeleton-functional model of the cause-effect regularities of the managed behavior of technical systems. Issue 5. — SPb.: Nauka, 2007.

Abstract. Are stated shareable systematic requirements produced to the simulators of operation to and the principles of driving by the conditions of technical systems (TS). Are detected the typed features of source descriptors TS impeding the construction of their simulators. Is proposed the structural-functional simulator of the processes of the control behavior of TS in the form of the IDEF0 chart allowing pictorial to present and analyze the regularities of their cause-effect relations from general system attitudes. The detail of the attributes of this simulator lets to ground and to develop the shareable systematic methods of the formalization of the verbal descriptors of the principles of driving and operation TS. — Bibl. 10 items.

1. Введение

Принятие решений по управлению поведением технических систем (ТС) в пространстве состояний (далее — управление ТС) невозможно без использования моделей и знания правил функционирования ТС. Эти правила определяются конструкцией и условиями эксплуатации ТС в различных ситуациях и содержатся в соответствующей конструкторской документации, которая может рассматриваться в качестве исходной информации для их моделирования.

Существующие подходы к моделированию процессов управляемого поведения ТС (далее — к моделированию ТС) можно условно разделить на аналитические (численные) и качественные (логические) методы. Однако структурная и функциональная сложность правил управляемого поведения сложных ТС практически исключила возможность использования для этого аналитических методов [1]. Для решения этой задачи сегодня используются качественные методы анализа и моделирования, основанные на выявлении логических и причинно-следственных закономерностей в поведении ТС и использовании различных смысловых понятий (подсистема, состояние, ситуация, структура и т.п.). Разработка новых и совершенствование существующих методов качественного

анализа и моделирования ТС осуществляется с целью повышения степени их конструктивизма и доведения до уровня технологий и инженерных методик.

Анализ исследований выполняемых в этой области позволил выявить три основных направления.

Теоретические разработки и подходы к моделированию сложных динамических систем. В качестве классического примера таких подходов можно рассматривать, например, работу [2]. Основная цель этих исследований заключается в определении свойств и ролевых функций различных объектов (состояний, целей) и факторов (управляющих, возмущающих воздействий; времени), влияющих на поведение динамических систем, а также в выявлении закономерностей этого поведения и представлении их в виде математических конструкций. Эти теоретические результаты позволяют понять общесистемные закономерности процессов поведения динамических систем и возможные варианты их отображения в виде структурированных формализованных моделей. При этом вопросы, связанные с поиском, анализом и отбором требуемой для этого информации о ТС, с выбором степени ее агрегации или детализации и т.п. в них не рассматриваются.

Вместе с тем в практике моделирования исходная информация о правилах функционирования и управления ТС предоставляется в достаточно произвольном виде. Особенности содержания и форм представления этой информации не позволяют непосредственно использовать имеющиеся теоретические результаты для построения формализованных моделей без предварительного анализа, семантической обработки и приведения этой информации к некоторому структурированному виду.

Теоретические и методические подходы к решению задач представления информации о моделях ТС в формах, удобных для их восприятия, анализа и последующего использования. Задача моделирования ТС может быть представлена в виде двух самостоятельных задач:

- поиск, анализ, отбор и структуризация информации (формирование знаний) о правилах функционирования и управления ТС, содержащейся в их исходных описаниях;
- отображение этой информации в виде, удобном для их восприятия и практического использования.

Каждая из этих задач решается самостоятельно разработчиками ТС, при составлении конструкторской документации, и ее пользователями, участвующими в процессах управления ТС. При этом как у разработчиков документации, так и у пользователей в силу различных субъективных факторов формируются различные знания и разные представления о ТС и ее моделях (рис. 1).

Естественно полагать, что содержание и методы решения этих задач существенно отличается друг от друга. В настоящее время в силу целого ряда причин (прежде всего из-за сложности поиска общесистемных методик моделирования) акценты сдвинуты в основном на решение второй задачи, которую часто необоснованно отождествляют с задачей моделирования ТС. Такое отождествление затеняет роль первой задачи, от решения которой непосредственно зависит функциональное и информационное наполнение модельных описаний ТС и, следовательно, их качественные характеристики.

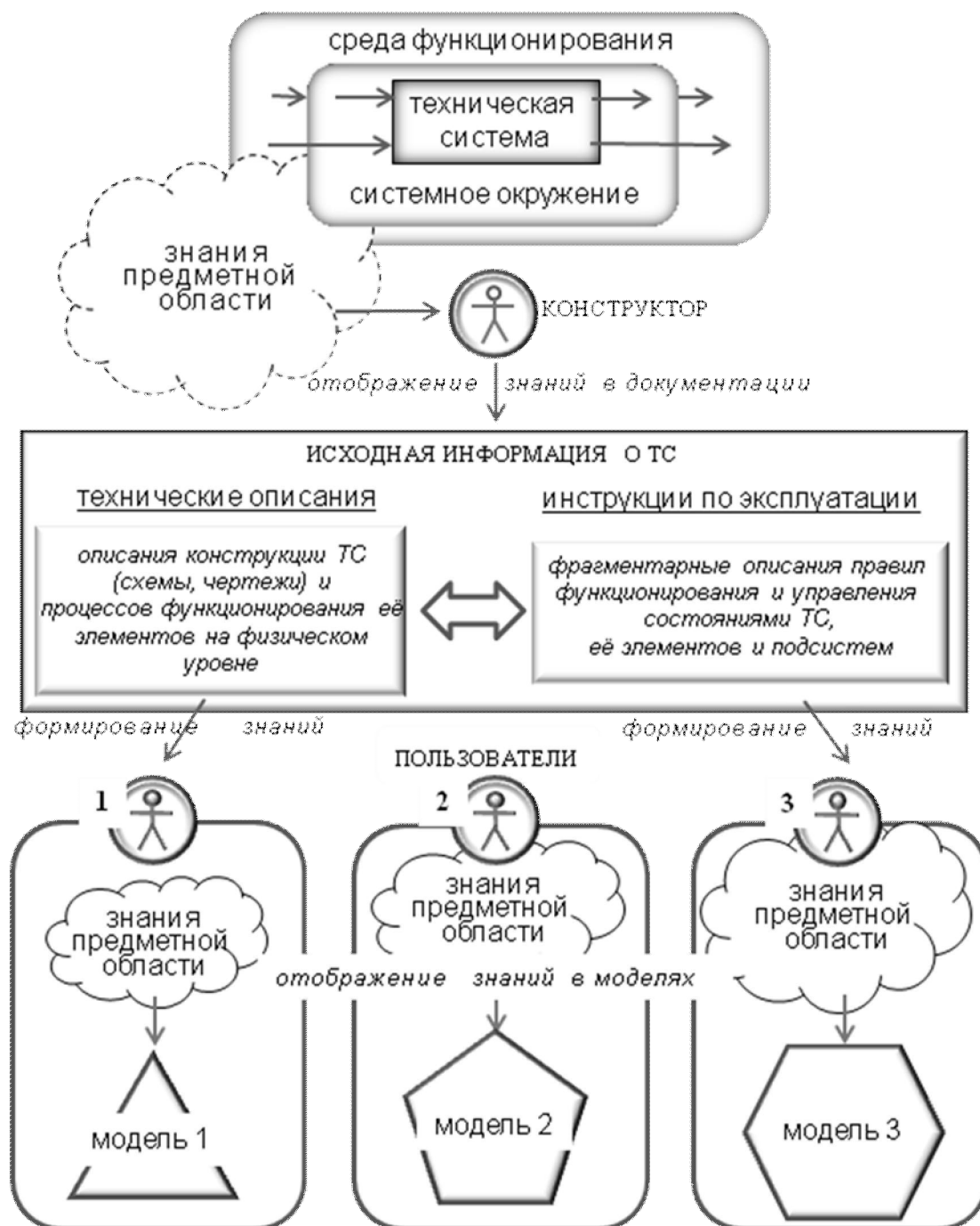


Рис. 1. Иллюстрация роли субъективных факторов при формировании знаний и представлении их в виде моделей ТС.

Естественно полагать, что содержание и методы решения этих задач существенно отличается друг от друга. В настоящее время в силу целого ряда причин (прежде всего из-за сложности поиска общесистемных методик моделирования) акценты сдвинуты в основном на решение второй задачи, которую часто необоснованно отождествляют с задачей моделирования ТС. Такое отождествление затеняет роль первой задачи, от решения которой непосредственно зависит функциональное и информационное наполнение модельных описаний ТС и, следовательно, их качественные характеристики.

К настоящему времени имеется достаточно много различных методов, инженерных методик, инструментальных средств и рекомендаций по способам и формам отображения знаний о процессах функционирования и управления ТС. В частности, в монографии [3] приводится обстоятельный анализ таких подходов. Практически все они ориентированы, прежде всего, на решение задачи представления информации о ТС в таких формах, которые позволяют упростить и автоматизировать разработку прикладного программного обеспечения автоматизированных систем управления (АСУ) ТС. При этом их характерной особенностью является то обстоятельство, что для их использования сначала всегда требуется каким-то образом предварительно сформировать и структурировать соответствующие представления о моделируемой предметной области (*т.е., по сути дела — построить ее модели*). Только после этого эти представления могут быть отображены с использованием этих методов в требуемых формах для разработки соответствующих программ. Общесистемных решений задачи формирования и структуризации таких представлений о ТС в этих работах не предлагается.

В то же время указанные методы достаточно широко используются в практике моделирования ТС. Они позволяют отобразить исходную информацию о ТС (в том числе и какие-то первичные, возможно и противоречивые исходные знания, имеющиеся на начальном этапе моделирования) в виде, исключаящим ее неоднозначное понимание всеми участниками разработки модели (заказчиками, исполнителями, потребителями и т.п.). При этом задача формирования и структуризации знаний о ТС решается с использованием различных эвристических подходов в процессе выполнения множества итераций: формирование знаний о ТС → представление знаний → анализ знаний → выявление потребностей в получении дополнительной информации → формирование дополнительных знаний о ТС → представление знаний. Процесс моделирования прекращается по субъективным соображениям при достижении взаимного согласия на это между его участниками.

Следует особо отметить, что при использовании этих методов очень большую роль играет также множество других субъективных факторов, обусловленных индивидуальными способностями и умениями участников разработки модели правильно определять функциональные границы предметной области, формировать и структурировать свои знания о ТС. Эти субъективные факторы в своей совокупности могут весьма негативно отразиться на качестве модели и, как следствие этого, — на функциональных возможностях управления ТС.

Теоретические подходы и инженерные методики, ориентированные на решение вопросов моделирования конкретных ТС. Такие подходы носят в основном узкоспециализированный характер и публикуются в отчетах о выполнении ведомственных научно-исследовательских работ. В подавляющем большинстве случаев они существенно привязаны к специфическим конструктивным особенностям моделируемых систем и процессов. Уникальность таких подходов делает невозможным или весьма затруднительным их сравнительный анализ и, самое главное, — не позволяет непосредственно использовать их применительно к моделированию других ТС.

Учитывая вышесказанное можно сделать вывод о том, что разработка общесистемных методов конструктивного решения задач формирования, структуризации и наглядного отображения знаний о процессах функционирования и правилах управления ТС представляет собой актуальное направление научных

исследований в интересах совершенствования как самих процессов моделирования, так и систем управления ТС в целом.

Эту задачу кратко можно сформулировать следующим образом.

Имеются некоторое исходное описание ТС и общесистемные требования к ее моделям.

Требуется разработать методы целенаправленного поиска, отбора и наглядного представления содержащейся в нем информации в виде формализованных и структурированных моделей ТС, отвечающих заданным требованиям.

2. Общесистемные требования к моделям ТС

Анализ задач, решаемых в процессе управления ТС, показывает, что в составе модельных описаний технической системы должны быть представлены следующие модели и правила:

- 1) модели управляемого поведения ТС в пространстве состояний;
- 2) правила идентификации текущих и целевых состояний ТС;
- 3) правила классификации ситуаций, возможных в процессе управления ТС, и принятия соответствующих им решений.

Необходимость включения правил ситуационного управления ТС в состав ее модельных описаний обусловлена тем обстоятельством, что из-за невозможности полного учета и достоверного предсказания всех факторов, влияющих на ТС, модели ее поведения в пространстве состояний могут рассматриваться только как некоторое огрубленное, приблизительное описание системы. Поэтому реальное поведение ТС при проявлении каких-то не учтенных факторов может не соответствовать ее моделям.

Факты несоответствия поведения ТС используемой в данный момент модели интерпретируются как *нештатные ситуации*, при возникновении которых требуется *оперативно* принимать те или иные решения, реализация которых предполагает установление соответствия между реальным поведением ТС и его модельным описанием. Необходимость в обеспечении высокой оперативности в принятии решений при возникновении штатных ситуаций обуславливает необходимость в предварительном формировании правил анализа ситуаций и правил ситуационного управления ТС и представления их в виде алгоритмов. Поэтому совокупность таких правил должна входить в состав модельных описаний ТС.

В требованиях к модельным описаниям необходимо учитывать общесистемные конструктивные особенности ТС, которые, в свою очередь, позволяют конкретизировать общесистемные свойства моделей. К таким особенностям ТС относятся:

- 1) реализуемые на конструктивном уровне возможности наблюдения и представления управляемого поведения технических систем в штатных условиях функционирования в виде *однозначных* реакций на управляющие воздействия¹.

Из этого следует, что модели и правила управления ТС также должны обеспечивать возможность принятия однозначных решений, т.е. быть *детер-*

¹Необходимо отметить, что для этого требуется на уровнях информационного и функционального описаний ТС соответствующим образом указать (выбрать) степень детализации информации о состояниях системы и условиях ее штатного функционирования, для которых выполняется это свойство.

минированными. Выполнение этого требования не означает, что однозначный выбор и реализация таких решений будут гарантировать детерминированную реакцию на них ТС. Однако модели ТС должны формироваться по возможности таким образом, чтобы вероятности (предполагаемые возможности) таких отклонений сводились к допустимому конструкцией ТС минимуму.

2) ограниченные конструкцией ТС конечные возможности наблюдения и детализации состояний и управления переходами между ними.

Из этого можно сделать вывод о том, что все компоненты модельного описания ТС также должны быть конечны. Кроме того они объективно должны иметь свои *предельные функциональные границы*, в рамках которых могут быть решены все потенциально допустимые для каждой конкретной технической системы управленческие задачи. Сужение этих границ при формировании модельного описания равноценно отказу от использования какой-то части информации о потенциально существующих возможностях детерминированного принятия решений при управлении ТС. Очевидно, что *в рамках таких «предельных» границ должна содержаться информация, необходимая и достаточная для решения всех возможных задач управления ТС*. В идеальном случае в модельных описаниях ТС должна использоваться именно такая информация.

В состав общесистемных требований к моделям ТС необходимо включить требования, формируемые с позиций потребителей таких моделей — персонала, управляющего ТС, и заказчиков программного обеспечения (ПО) АСУ ТС. Для каждой из этих категорий потребителей эти требования целесообразно рассматривать отдельно, т.к. их потребности в использовании моделей различны.

Управленческим персоналом модели ТС используются для обеспечения процессов принятия управленческих решений. Поэтому модели с этих позиций должны удовлетворять следующим дополнительным требованиям:

3) быть обозримыми. Это требование обусловлено необходимостью правильного восприятия и понимания причинно-следственных закономерностей поведения ТС и правил принятия решений. Оно может быть обеспечено путем декомпозиции моделей и правил при реализации возможностей:

- использования многомодельного описания ТС²;
- выбора степени агрегации информации о ТС требуемой для обеспечения процессов принятия таких решений;
- использования возможностей структурированного представления модельного описания ТС.

Модельное описание ТС должно допускать простую смысловую интерпретацию в терминах описания физических, энергетических и информационных процессов функционирования ТС и ее конструктивных элементов.

4) отображать правила принятия решений в алгоритмическом виде. Это требование может быть реализовано за счет представления правил в виде однозначных соответствий «множество целей → множество целевых состояний

² Поведение ТС всегда в той или иной мере зависит от целого ряда внешних условий: состояний ее внешней среды; состояния жизненного цикла и времени существования системы; состояний ее внешних энергетических ресурсов; целей управления ТС. Поэтому различным комбинациям состояний перечисленных факторов могут соответствовать различные модельные описания ТС, что обуславливает возможности ее многомодельного представления. При таком представлении должны быть дополнительно разработаны правила выбора модельных описаний ТС, соответствующих текущим условиям ее функционирования.

ТС», «множество ситуаций управления ТС → множество решений» и т.п. Такие соответствия, в свою очередь, могут быть представлены в виде таблиц решений и (или) в виде алгоритмов последовательной проверки выполнения простых логических условий «если — то». Работа с такими таблицами и алгоритмами (*алгоритмическими моделями ТС*) не требует от пользователей особых интеллектуальных затрат, высокой профессиональной квалификации и длительного обучения.

5) быть функционально полными. Пользователи заинтересованы в том, чтобы модельное представление ТС соответствовало своим «предельным» функциональным границам. Однако это может противоречить требованию обзорности моделей, т.к. модели и правила, соответствующие таким функциональным границам могут содержать хотя и конечные, но в тоже время реально необозримые множества составляющих их объектов (состояний, ситуаций и т.п.). Выбор рациональных функциональных границ модельного описания ТС представляет собой отдельную и достаточно нетривиальную задачу. Поэтому требование функциональной полноты моделей ТС следует рассматривать относительно каких-то дополнительных ограничений, например, установленных сроков разработки моделей, объемов ее финансирования и т.п.

6) не содержать избыточной информации. Это требование актуализируется при сужении предельных функциональных границ моделей ТС. При этом в любом случае в этих моделях должна отсутствовать избыточная информация.

Заказчикам ПО модели ТС необходимы для обеспечения возможностей разработки обоснованных требований к АСУ ТС, упрощения процедуры их согласования с разработчиками ПО, а также для управления масштабом ПО и ресурсным обеспечением работ при его создании. Модели с позиций таких заказчиков должны удовлетворять следующим дополнительным требованиям:

7) быть конструктивными. Это означает, что должны существовать методы формирования моделей по имеющейся исходной информации о ТС, в том числе с использованием информации получаемой от экспертов.

8) допускать возможности представления в различных функциональных границах.

9) допускать количественные и качественные оценки своих функциональных возможностей.

Возможности изменения и оценки функциональных границ модельных описаний ТС (масштаба моделей) могут быть реализованы за счет варьирования составом множества правил ситуационного управления путем исключения из него или, наоборот, дополнительного включения тех или иных элементов «ситуация → решение». Например, из этого множества могут быть исключены все такие ситуации, для которых не является критичным выполнение требования обеспечения высокой оперативности в принятии решений. Возможность многовариантного представления правил ситуационного управления позволяет сформулировать и решать задачу рационального (оптимального) выбора содержания модельных представлений ТС в условиях различных ресурсных ограничений.

3. Особенности содержания и форм представления исходных описаний ТС

Эти особенности, в первую очередь, обусловлены следующими обстоятельствами:

1) отсутствием общесистемных методик, позволяющих изначально представлять знания о ТС (исходные описания) в виде формализованных и структурированных моделей и правил;

2) наличием множества субъективных факторов и альтернативных возможностей:

- рассмотрения и описания одних и тех же смысловых понятий, функций, правил и т.п. с разных позиций (точек зрения);
- представления этих понятий на различных уровнях детализации;
- использования для этого разной по объему и содержанию информации и разнообразных форм ее наглядного представления.

В результате исходные описания ТС (конструкторская и эксплуатационно-техническая документация) формируются исходя из субъективных представлений их авторов о предметной области, а также их индивидуальных способностей и предпочтений.

Характерными особенностями исходных описаний ТС, существенно затрудняющими построение моделей являются:

- преимущественно вербальная форма представления информации допускающая ее неоднозначное восприятие;
- многовариантные, «размытые» или неявные описания функциональных границ объекта моделирования, что затрудняет его однозначное представление на функциональном уровне и выполнение процессов целенаправленного поиска, отбора и использования информации необходимой для моделирования ТС;
- использование различных смысловых трактовок понятия «состояние» и правил их идентификации, в том числе для одних и тех же объектов и процессов;
- описание моделей и правил в виде множества их отдельных фрагментов, информация о порядке (структуре взаимодействия) и условиях целевого использования которых также может быть представлена в фрагментарном виде;
- отсутствие или использование незначительного объема информации о правилах ситуационного управления ТС в нестандартных ситуациях по отношению к потенциально существующим конструктивным возможностям системы по их выявлению и принятию соответствующих им решений;³
- использование уровней детализации исходной информации неадекватных целям ее использования, что обуславливает ее избыточность или же, наоборот, недостаточность для построения моделей, удовлетворяющих сформулированным выше общесистемным требованиям;
- отсутствие в исходных описаниях ТС отдельных правил или условий их выполнения и применения, использование которых предполагается «по умолчанию».

Исходные описания ТС, как правило, содержат в себе информацию о разных представлениях процессов функционирования ТС: на физическом, энергетическом, информационном и функциональном уровнях [1]. Это обстоятельство может дополнительно затруднить построение моделей, но, в то же время, оно

³ Такие решения могут предполагать выполнение действий как по переводу ТС в какие-то определенные состояния, так и по выбору другого модельного представления ТС или внесению каких-то изменений в используемых моделях для приведения их в соответствие с изменением структуры ТС соответствующему выявленной нестандартной ситуации.

позволяет существенно упростить решение задачи смысловой интерпретации используемых в исходных описаниях ТС понятий.

4. IDEF0-модель причинно-следственных закономерностей управляемого поведения ТС

Упростить решение проблем построения моделей ТС по их исходным описаниям можно путем теоретического обоснования и анализа возможностей фрагментарного представления этих моделей и решения обратной задачи — разработки методов композиции таких фрагментов и представления их в виде структурированных моделей управляемого поведения ТС. Такое обоснование позволит перейти к разработке соответствующих инженерных методик целенаправленного поиска, отбора и структурированного формализованного представления правил управления состояниями ТС по их исходным описаниям в требуемом виде и формах.

Очевидно, что наибольшую значимость методы построения таких моделей приобретут в том случае, если они будут разработаны с общесистемных позиций, но в тоже время будут обеспечивать достаточно широкие возможности их конструктивного использования на практике.

Выполнение этого требования можно обеспечить при рассмотрении процессов функционирования ТС на *структурно-функциональном* уровне при абстрагировании от многообразных конструктивных особенностей и способов их реализации. Для этого предлагается использовать методологию структурно-функционального анализа и моделирования сложных процессов — SADT [6] и построить IDEF0-модель процессов управляемого функционирования гипотетической ТС, которую можно было бы рассматривать в качестве гомоморфного прообраза моделей поведения реальных технических систем. Такая модель должна быть представлена в виде набора типовых функций, выполняемых ТС и структуры информационных и управляющих взаимосвязей между ними (здесь и далее используется терминология, принятая в SADT).

С общесистемных позиций, в составе ТС могут быть выделены три типа конструктивных объектов, имеющих различное функциональное назначение. Назовем их «*управляющие устройства*» (УУ), «*исполнительные подсистемы*» (ИП) и «*ресурсы*» (РС).

Функциональное назначение УУ состоит в изменении своих состояний в соответствии с управляющими воздействиями. Изменение состояний УУ в моделях ТС будем рассматривать как *непосредственную* причину последующего изменения состояний ее ИП. УУ имеют простую смысловую интерпретацию во множестве конструктивных элементов ТС. Это — выключатели, переключатели, управляемые таймеры, потенциометры, заслонки, задвижки и т.п.

Модели таких устройства соответствуют классу детерминированных моделей дискретных устройств. Выявление УУ в ТС, построение их моделей, определение состава и семантическая интерпретация их состояний не вызывает особых затруднений. УУ всегда входят в состав любой управляемой ТС.

ИП представляют собой технические устройства или их совокупности в составе ТС, которые в штатных условиях функционирования могут изменять свои состояния только вследствие изменения состояний взаимодействующих с ними управляющих устройств системы. Отдельные состояния ИП и (или) их подмножества могут рассматриваться в качестве целевых состояний ТС.

РС представляют собой материальные ресурсы различной природы, которые используются для обеспечения процессов *автономного* функционирования УУ и (или) ИП ТС. Например, в ТС — «автомобиль» входят следующие виды ресурсов: электроэнергия аккумулятора, горючее, моторное масло, тормозная жидкость, охлаждающая жидкость, жидкость для омывания стекол, масла и смазки различных механических подсистем автомобиля.

Состояния РС, также как и состояния УУ, имеют простую смысловую интерпретацию. Они всегда могут быть выражены в виде количественных или численных значений соответствующих им физических параметров (значение электрического напряжения на клеммах аккумулятора, объем или уровень горючего в топливном баке и т.п.). Процессы изменения состояний РС во времени определяются их физическими особенностями (природой), а также состояниями ИП и УУ, функционирование которых обеспечивается за счет потребления этих ресурсов. Моделирование поведения РС, как правило, осуществляется методами моделирования непрерывных процессов.

Известно [7], что поведение ТС для разных условий ее функционирования может быть представлено множеством соответствующих им моделей, т.е. предполагает многомодельное представление. Для повышения степени наглядности IDEF0-модели построим ее применительно к некоторому заданному интервалу времени существования ТС относительно фиксированных состояний внешних условий ее функционирования (в их состав могут входить также состояния источников внешнего ресурсного обеспечения ТС). Это договоренность позволит, не теряя общности последующих рассуждений, не отображать в графическом изображении IDEF0-модели множество отвечающих этим условиям малоинформативных (относительно последующих рассуждений) связей.

IDEF0-модель процессов функционирования гипотетической ТС представлена на рис. 2.

Отметим, что широко употребляемый в теории систем термин «управляющее воздействие» сознательно заменен в рассматриваемой модели термином «команда управления» (КУ). Это сделано вследствие того, что этот термин в отличие от термина «управляющее воздействие», несет в себе *только смысловое* содержание указания на то, в какое состояние должно перейти управляющее устройство ТС после выдачи соответствующей ему команды («закрыть электрическую цепь», «открыть задвижку» и т.п.). Его использование позволяет абстрагироваться при построении моделей поведения этих устройств от их конструктивных особенностей. При этом обеспечивается возможность рассмотрения моделей поведения УУ только на их общесистемном функциональном уровне.

Модель построена из предположения, что ТС в своем составе содержит n УУ, m ИП и k РС, где n, m и k некоторые конечные числа ($n \geq m$). Она отражает реакцию ТС на команды управления, выраженную в причинно-следственной последовательности процесса инициирования функций, выполняемых УУ, ИП и РС.

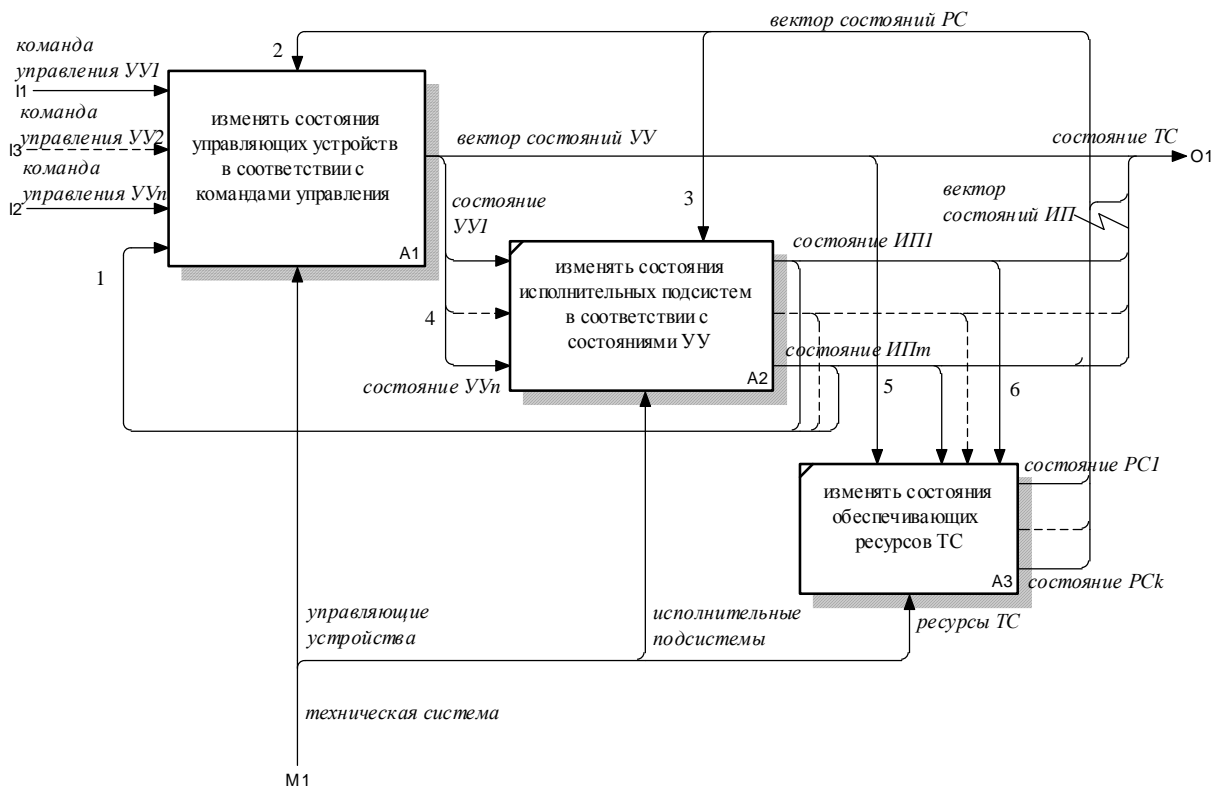


Рис. 2. IDEF0-модель процессов функционирования гипотетической технической системы.

В модели допускается также использование в качестве КУ информации о состояниях ИП ТС (вход 1 блока A1). Это позволяет отразить в ней возможность управления состояниями УУ с использованием обратных связей с ИП. Наличие таких связей характерно для процессов функционирования ТС с системами встроенной автоматики.

Управляющие входы 2 и 3 блоков A1 и A2 соответствуют состоянию или некоторому подмножеству состояний ресурсов ТС. Для блоков A1 и A2 такие состояния рассматриваются как необходимые условия, при выполнении которых УУ и ИП могут определенным заранее образом выполнять свои функции. При разных состояниях ресурсов ТС эти функции могут выполняться по-разному (в частности, за большее или меньшее время) или вообще не выполняться. Это отражает ситуацию, когда функционирование УУ и ИП обеспечивается автономными источниками энергии ТС, в процессе расходования которых естественным образом изменяется их поведение. Поэтому такие условия можно использовать для выбора моделей УУ и ИП, соответствующих заданным (текущим) состояниям ресурсов ТС. В свою очередь от состояний УУ и ИП и времени нахождения в них этих устройств могут зависеть правила изменения состояний ресурсов ТС (управляющие входы 4 и 5 блока A3). Т.е. для различных состояний УУ и ИП этим правилам могут соответствовать различные модели поведения РС.

Такая взаимозависимость моделей УУ, ИП и РС от состояний друг друга затрудняет анализ модели ТС. Аналогичная ситуация присуща моделям гибридных систем (IDEF0-модель также может рассматриваться как модель гибридной системы). Она разрешается за счет исключения в них отдельных обратных связей. Состояния этих связей или подмножества таких состояний рассматриваются на определенных интервалах времени в качестве условий для

выбора и анализа модели ее дискретной или, наоборот, непрерывной составляющей [8].

Применительно к ТС, как правило, наиболее актуальной является задача моделирования правил функционирования ее УУ и ИП, которая решается относительно каких-то заданных подмножеств состояний РС, в границах которых ресурсы системы могут находиться достаточно продолжительное время. Эта особенность ТС позволяет рассматривать ее IDEF0-модель без учета обратных связей 2 и 3, однако при этом соответствующие этим связям подмножества состояний РС должны быть включены в состав условий для выбора отвечающих им моделей УУ и ИП. Дальнейшее рассмотрение модели ТС будем осуществлять с учетом этого обстоятельства.

Предложенная модель может рассматриваться в качестве гомоморфного прообраза моделей функционирования реальных ТС. Для построения таких моделей в IDEF0-модели гипотетической ТС необходимо конкретизировать численный состав УУ, ИП и РС (значения параметры n, m, k) и связи их взаимодействия. При этом из исходной модели могут быть исключены отдельные функции и связи между ними. Они предполагаются в IDEF0-модели гипотетической ТС в качестве вырожденных функций и связей, которые не учитываются и не рассматриваются в IDEF0-модели реальной системы.

Так, например, если в составе реальной ТС отсутствуют внутренние источники ее энергообеспечения, т.е. ее функционирование обеспечивается только за счет использования каких-то внешних ресурсов, то из IDEF0-модели гипотетической ТС исключается блок АЗ и все входящие и исходящие из него связи.

Возможности построения структурно-функциональных моделей причинно-следственных закономерностей процессов управления реальными ТС путем соответствующей параметризации функционального состава и изменения структуры IDEF0-модели гипотетической ТС позволяет рассматривать ее в качестве основы для построения системы классификации моделей функционирования реальных ТС по оценкам их структурной и функциональной сложности. Очевидно, что простейшим элементом такой системы классификации является модель ТС — «устройство управления» ($n=1, m=0, k=0$), имеющую только два состояния и единственную команду управления, определяющую условие перевода из одного состояния такой системы в другое.

Результаты анализа рассматриваемой модели могут быть доведены до степени детализации, на которой обеспечивается возможность разработки практических рекомендаций и методов моделирования ТС. Для этого предлагается использовать следующие общесистемные особенности ТС.

1) Каждое устройство управления всегда может рассматриваться как *независимая* техническая подсистема ТС. Управление состояниями каждым таким УУ осуществляется по командам управления, относящихся только к этому устройству и не изменяющих состояния других УУ ТС. Команды управления поведением соответствующего им УУ выдаются (реализовываются) только последовательно, после завершения процесса отработки предшествующей КУ.

2) Переход из одного состояния УУ в другое может осуществляться только по *единственной* команде управления, *взаимно-однозначно* соответствующей этому переходу. Временные характеристики условий таких переходов задаются в виде интервала времени (в частном случае — момента времени), в течение которого предполагается, что такой переход должен гарантированно состояться после выдачи соответствующей ему КУ.

3) Структура допустимых последовательностей изменения состояний различных устройств управления в ТС и, следовательно, — структура допустимых последовательностей команд управления определяется составом и правилами взаимодействия ИП в ТС. С другой стороны, в соответствии с законом «необходимого разнообразия» [9] и определением понятия «команда управления» в IDEF0-модели ТС каждой такой допустимой последовательности КУ должна *взаимно-однозначно* соответствовать определенная результирующая совокупность состояний УУ, которой, в свою очередь, должна *однозначно* соответствовать некоторая допустимая совокупность состояний исполнительных подсистем ТС.

4) Любая ТС создается для выполнения строго определенного множества целей, каждая из которых *однозначно* идентифицируется во множестве возможных состояний ИП и (или) УУ.

Детализация свойств рассматриваемой IDEF0-модели гипотетической ТС с учетом перечисленных общесистемных свойств ТС позволила получить следующие результаты.

1) Правила управления состояниями УУ в ТС могут быть представлены в виде множества α их фрагментарных описаний

$$\alpha = \{\alpha_i \mid \forall i \in \overline{1, n}\}; \quad \alpha_i : C_i \times K_i \times C^i \times T \rightarrow C_i,$$

где:

α_i — функция (модель), соответствующая правилам переходов в пространстве состояний i -го УУ — C_i ;

K_i — множество команд управления i -м УУ;

$C^i = \{x(C_j \cup \emptyset) \mid \forall j \in (\overline{1, n} \setminus i)\}$, C_j — множество состояний j -го УУ; \emptyset — «пустой» элемент;

T — множество конечных временных интервалов.

Такое представление правил (его ближайший аналог — системы взаимосвязанных графов [10]) имеет существенную практическую значимость, т.к. широко используемые в исходных описаниях ТС возможности фрагментарного вербального представления правил управления ее поведением до сих пор не имели приемлемого логического обоснования и формализованной трактовки, что затрудняло их анализ и построение моделей.

2) Множество C^i в каждой модели α_i рассматривается как множество контекстных условий, при выполнении которых допускается выдача команды управления для i -го УУ. Эти контекстные условия содержат в себе информацию о структуре допустимых в системе последовательностей КУ (изменений состояний УУ), представленную в неявном виде. Их можно использовать для определения на множестве имен УУ бинарного отношения \succ :

$$\forall j \in \overline{1, n} \quad \forall i \in \overline{1, n} \quad [j \succ i \Leftrightarrow \text{Pr}_j C^i \neq \emptyset].$$

Отношение \succ отражает информацию о том, что процесс управления i -ым УУ *непосредственно* зависит от состояний j -го УУ. Это отношение может быть использовано для построения отношения *строгого порядка* во множестве классов $F (n \geq |F|)$ такого разбиения множества имен УУ, каждый класс которого включает в себя только имена устройств управления, правила управления состояниями которых взаимно связаны друг с другом контекстными условиями. Порядок управления состояниями УУ, принадлежащими одному и тому же классу такого разбиения зависит от состояний друг друга.

3) Возможности восприятия и анализа правил управления состояниями взаимосвязанных УУ (их имена принадлежат одному и тому же классу указанного выше разбиения) достаточно затруднены. Выход из этой ситуации состоит в разработке и выполнении специальных правил композиции моделей УУ, позволяющих представить каждый класс f ($f \in F$) взаимосвязанных УУ виде агрегированной модели их совместного поведения в пространстве агрегированных состояний \hat{C}_f , где: $\hat{C}_f \subseteq C_r \times C_e \times \dots \times C_y$; C_r, C_e и C_y — множества состояний УУ с именами r, e и y . Отношение \succ может быть использовано для построения отношения строгого порядка во множестве имен агрегированных моделей УУ.

4) 4. Модели поведения исполнительных подсистем ТС и структура их взаимодействия друг с другом могут быть построены с использованием информации об агрегированных моделях УУ, структуры их взаимодействия и закона «необходимого разнообразия». Последний, в частности, определяет следующие ограничения в выборе степени агрегации информации о состояниях исполнительных подсистем: множество состояний ИП — G должно выбираться таким образом, чтобы существовали однозначные соответствия $\alpha: \hat{C} \rightarrow G$, $\beta: G \rightarrow Q$, $\gamma: \hat{C} \rightarrow Q$ и выполнялось равенство $\alpha \circ \beta = \gamma$, где \hat{C} — множество векторов состояний агрегированных моделей УУ, а Q — множество имен целей управления состояниями ТС.

5. Заключение

Выявление общесистемных закономерностей ТС и использование методологии SADT позволило построить принципиально новую структурно-функциональную модель причинно-следственных процессов управляемого поведения ТС.

Полученная при этом IDEF0-модель гипотетической ТС может рассматриваться в качестве основы для построения и классификации структурно-функциональных моделей поведения реальных технических систем.

Детализация свойств этой модели позволяет обосновать и объяснить возможности представления моделей ТС в виде множества фрагментарных описаний правил управляемого поведения ее устройств управления, исполнительных подсистем и ресурсов. Для формализации таких фрагментарных представлений моделей ТС может быть использован математический аппарат описания систем взаимосвязанных графов. Фрагментарные описания могут быть представлены также в наглядной графической форме в виде системы ориентированных графов с размеченными специальным образом вершинами и дугами (вершины — именами состояний, дуги — условиями переходов в пространстве состояний УУ и ИП ТС).

Совокупность представленных здесь результатов может рассматриваться в качестве одного из необходимых условий для разработки общесистемных методы формализации и структуризации исходных фрагментарных вербальных описаний правил управления и функционирования ТС.

Литература

1. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
2. *Калман Р., Фалб П., Арбиб М.* Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971. 400 с.

3. *Шалыто А. А.* SWITCH-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. СПб.: Наука, 1998. 628 с.
4. *Кириллов Н. П.* Определение функциональных границ процессов управления состояниями технических систем с использованием методологии SADT. Труды СПИИРАН. Вып. 4. СПб.: Наука, 2007. С. 289–305.
5. *Волкова В. Н., Денисов А. А.* Основы теории систем и системного анализа. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 512 с.
6. *Марка Д. А., Мак Гоуэн К.* Методология структурного анализа и проектирования. М.: МетаТехнология, 1993. 240 с.
7. *Кириллов Н. П.* Построение моделей процессов функционирования технических систем по их исходным описаниям // Известия Вузов. Приборостроение, том №49, №11, 2006. С. 12–16.
8. *Парийская Е. Ю.* Сравнительный анализ математических подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем. Труды Уральского НИИ Математики РАН, том 1, 1997. С. 11–14.
9. *Эшби У. Р.* Введение в кибернетику. М.: ИЛ, 1969. 432 с.
10. *Михайлов Г. И., Руднев В. В.* Автоматная система взаимосвязанных графов с простейшими связками // Автоматика и телемеханика, № 5, 1980. С. 37–41.