

**IDEF0-МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ****Н. П. Кириллов (Санкт-Петербург)**

Управление состояниями технических систем (ТС) невозможно без знания правил их функционирования (использования имитационных моделей). Очевидно, что наибольшую значимость методы построения таких моделей приобретут, если они будут разработаны с общесистемных позиций, но в то же время будут обеспечивать достаточно широкие возможности их конструктивного использования на практике. Это можно обеспечить при рассмотрении процессов функционирования ТС на *структурно-функциональном* уровне при абстрагировании от многообразных конструктивных возможностей и способов их реализации. Для этого предлагается использовать методологию структурно-функционального анализа и моделирования сложных процессов – **SADT** [1] и построить **IDEF0**-модель процессов управляемого функционирования гипотетической ТС (далее – модель 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 вида конструктивных объектов, имеющих различное функциональное назначение. Назовем их «управляющие устройства» (**УУ**), «исполнительные подсистемы» (**ИП**) и «ресурсы» (**Р**).

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 интерпретацию во множестве конструктивных элементов ТС. Это – выключатели, переключатели, управляемые таймеры, потенциометры, заслонки, задвижки и т. п. Такие модели относят к классу детерминированных моделей дискретных устройств. Семантическая интерпретация состояний и построение таких моделей **УУ** 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.

**Р** представляют собой материальные ресурсы различной природы и назначения, 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 **Р**, так же как и состояния **УУ**, имеют простую смысловую интерпретацию. Они всегда могут быть выражены в виде количественных (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 **Р** во времени определяются их физическими особенностями (природой), а также состояниями **ИП** и **УУ**, функционирование которых обеспечивается за счет потребления этих ресурсов. Моделирование

поведения  $P$ , как правило, осуществляется методами моделирования непрерывных процессов.

Известно [2], что поведение  $ТС$  для разных условий ее функционирования может быть представлено множеством соответствующих 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 (для последующих рассуждений) связей.

$IDEF0$ -модель процессов функционирования гипотетической  $ТС$  представлена на рис. 1.

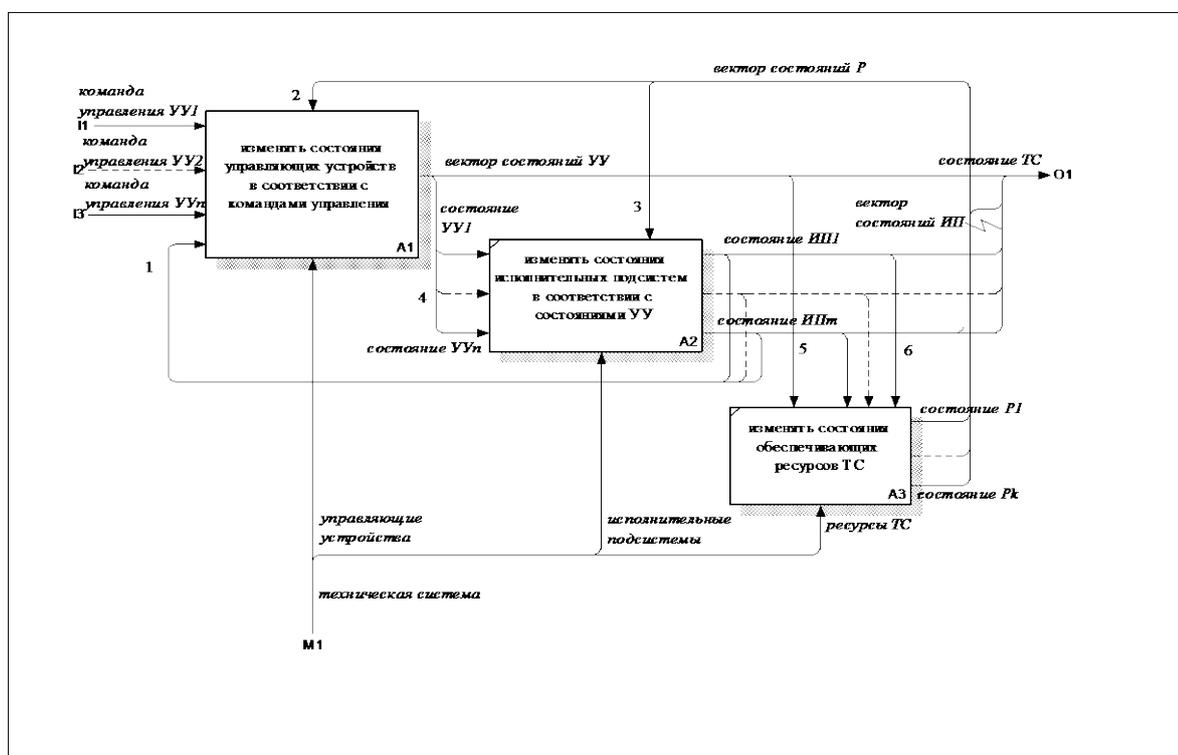


Рис. 1. IDEF0-модель процессов функционирования гипотетической технической системы

Отметим, что широко употребляемый в теории систем термин «управляющее воздействие» сознательно заменен в рассматриваемой модели термином «команда управления» (КУ). Этот термин несет в себе *только смысловое* содержание указания на то, в какое состояние должно перейти управляющее устройство  $ТС$  после выдачи той или иной соответствующей ему КУ («замкнуть 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 рассматривать модели поведения  $УУ$  только на их функциональном (общесистемном) уровне.

Модель построена из предположения, что  $ТС$  включает  $n$   $УУ$ ,  $m$   $ИП$  и  $k$   $Р$ , 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  $Р$ . В качестве КУ в модели допускается ис-

пользование 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 заранее определенным 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 и времени нахождения в них **УУ** и **ИП** 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 **P**.

Такая взаимозависимость моделей **УУ**, **ИП** и **P** 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 [3]. Применительно к **ТС**, как правило, наиболее актуальной является задача моделирования правил функционирования ее **УУ** и **ИП**, которая решается относительно каких-то заданных подмножеств состояний **P**, в 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 **P** 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 этого в ней необходимо конкретизировать численный состав **УУ**, **ИП** и **P** (параметры  $n, m, k$ ) и связи их взаимодействия. При этом из исходной **IDEF0**-модели гипотетической **ТС** могут быть исключены отдельные функции и связи между ними. Так, например, если функционирование реальной **ТС** обеспечивается только за счет использования каких-то внешних ресурсов, то из исходной модели исключается блок **A3** и все его входящие и исходящие связи. Это обстоятельство позволяет рассматривать такую **IDEF0**-модель в качестве основы для построения системы классификации структурной и функциональной сложности моделей функционирования реальных **ТС**. Очевидно, что простейшим элементом такой системы классификации является модель **ТС**—«устройство управления» ( $n=1, m=0, k=0$ ), имеющую только два состояния и единственную **KУ**, 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 **УУ** всегда может рассматриваться как *независимая* техническая подсистема **ТС**. Управление состояниями каждым таким **УУ** осуществляется по командам

управления, относящихся только к этому устройству, не изменяющих состояния других УУ ТС. Команды управления поведением соответствующего им УУ выдаются только последовательно, после завершения процесса обработки предшествующей КУ.

2. Переход из одного состояния УУ в другое может осуществляться только по *единственной* команде управления, *взаимно однозначно* соответствующей этому переходу. Временные характеристики 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 УУ 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» [4] 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 с учетом перечисленных общесистемных свойств ТС позволила получить следующие результаты.

1. Правила управления состояниями УУ в ТС могут быть представлены в виде множества  $\alpha$  их фрагментарных описаний –  $\alpha = \{\alpha_i \mid \forall i \in \overline{1, n}\}$ , где:  $\alpha_i : C_i \times K_i \times C^i \times T \rightarrow C_i$ ,  $\alpha_i$  – функция (модель), соответствующая правилам переходов в пространстве состояний  $C_i$   $i$ -го УУ;  $K_i$  – 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 аналог – системы взаимосвязанных графов [5]) имеет достаточно 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  $\alpha_i$  рассматривается как множество контекстных условий, при выполнении которых допускается выдача КУ  $i$ -м 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  $\succ$ :  $\forall j \in \overline{1, n} \forall i \in \overline{1, n} [j \succ i \Leftrightarrow Pr_j C^i \neq \emptyset]$ , которое отражает информацию о том, что процесс управления  $i$ -ым УУ *непосредственно* зависит от состояний  $j$ -го УУ. Используя это отношение, можно построить отношение *строгого порядка* во множестве классов  $F$  ( $n \geq |F|$ ) такого разбиения множества имен УУ, каждый класс которого включает в себя только имена взаимосвязанных контекстными условиями УУ, порядок управления состояниями которых *взаимно* 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 выполнении специальных правил композиции моделей УУ, позволяющих представить каждый класс  $f$

( $f \in F$ ) взаимосвязанных УУ в виде агрегированной модели их совместного поведения в пространстве 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  $y$ . При этом структура правил управления состояниями УУ будет представлена уже в виде отношения строгого порядка во множестве имен агрегированных моделей УУ.

4. Модели поведения и структура взаимодействия друг с другом исполнительных подсистем ТС определяются 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 целей управления ТС.

### Заключение

Использование методологии SADT, выявление и использование общесистемных закономерностей ТС позволило построить принципиально новую структурно-функциональную модель причинно-следственных процессов управляемого поведения ТС. Полученная IDEF0-модель может рассматриваться в качестве основы для построения и классификации структурно-функциональных моделей поведения реальных ТС. Предложенная модель может рассматриваться как концептуальное описание исследуемой предметной области и в дальнейшем будет формально описываться и исследоваться с использованием средств аналитико-имитационного моделирования. Детализация свойств этой модели позволяет обосновать и разработать общесистемные методы формализации и структуризации исходных фрагментарных вербальных описаний правил управления и функционирования ТС.

### Литература

1. Марка Д. А. МакГоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования. – М.: МетаТехнология, 1993, 240 с.
2. Кириллов Н. П. Построение моделей процессов функционирования технических систем по их исходным описаниям//Известия вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, 11. С. 12–16.
3. Парийская Е. Ю. Сравнительный анализ математических подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем//Труды Уральского НИИ математики РАН. Т. 1. 1997.
4. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. М.: ИЛ, 1969. 432 с.
5. Михайлов Г. И., Руднев В. В. Автоматная система взаимосвязанных графов с простейшими связками//Автоматика и телемеханика. 1980. № 5.