

Раздел "Клуб журнала" обычно знакомит читателей с короткими научно-техническими зарисовками, отражающими мнения специалистов по тем или иным явлениям в промышленной автоматизации, содержащими вопросы к коллегам, консультации экспертов по выбору и использованию современного оборудования и т.п.

Сегодня в рамках заседания Клуба впервые на обсуждение выносятся внешне вполне обычная статья, затрагивающая популярные среди авторов журнала темы математического моделирования и поддержки принятия решений. Однако эта статья привычна по форме сверстанного материала, но не по содержанию. Автор излагает новые мысли и нестандартные подходы к формализации описания объектов. С чем-то в этой статье можно согласиться, а с чем-то — поспорить. Именно такой и была реакция рецензентов.

Но, несмотря на критические замечания со стороны экспертов статья представляет несомненный интерес для специалистов по промышленной автоматизации. Изложенные в ней подходы побуждают читателя отойти от привычных взглядов и шире посмотреть на исследуемую область знаний.

Предлагаем вниманию читателей журнала "Автоматизация в промышленности" статью А.Б. Бахура "Системное описание объектов — подходы к формализации", а также замечания специалистов, комментирующих достоинства и недостатки предложенных в статье идей. Приглашаем читателей к продолжению дискуссии. Все поступившие комментарии и мнения по обсуждаемой статье будут обработаны и опубликованы в следующих номерах журнала.

СИСТЕМНОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ — ПОДХОДЫ К ФОРМАЛИЗАЦИИ

А.Б. Бахур (НИИ Космических систем имени А.А. Максимова)

В настоящей статье представлен образец системной модели, предназначенной для поддержки принятия проектных решений. Основной идеей модели является совмещение "поведения" проектируемого объекта в пространстве "внешних" координат, характеризующих состояние объекта по отношению к заданной цели, и в пространстве "внутренних" координат, характеризующих функциональное состояние объекта. Таким образом моделируется конфликт между тем, что необходимо для достижения цели, и располагаемыми функциональными возможностями.

Ключевые слова: система, системная модель, проектирование, структурно-функциональная организация.

Системное описание объектов как в исследовательской, так и инженерной практике по своему смыслу играет основную роль. Позволяя моделировать исследуемое как целое образование, оно открывает возможности формулирования постановок задач его последующего изучения. Именно это позволяет рассматривать системные модели как отдельный класс, обладающий собственными, только ему присущими свойствами и особенностями. При проектировании современных космических аппаратов необходимость такого моделирования проявилась очень сильно. Располагая весьма ограниченными возможностями (в силу ограничений, накладываемых на выводимую на орбиту массу), они должны достаточно эффективно выполнять большой набор разнообразных функций. То есть при их проектировании должен быть найден компромисс между составными частями, обусловленными этим разнообразием функций, позволяющий выполнить общее назначение — цель полета.

Однако в настоящее время нет общепризнанной методологии системного моделирования. Есть разнообразные разработки, выполненные для решения отдельных задач, на основе которых предприняты попытки методических обобщений [1-3]. Попытки их непосредственного применения для формализации подходов к решению задачи достижения компромисса между отдельными составляющими современных сложных технических систем, таких как космические

аппараты, оказались безрезультатными. Однако в ходе этих методологических исследований возникла идея нового подхода к формализации, на основе которой и была сформирована методическая схема, представленная в настоящей статье.

Характерный пример

Чтобы лучше понять методические особенности представленного подхода к системному описанию, рассмотрим следующий пример.

В 1945 г. в конструкторском бюро (КБ) Микояна и Гуревича в ходе проектирования реактивного истребителя МиГ-9 была выпущена стенгазета "Кому что снится". Она хранится (и заслуженно) в Политехническом музее. В этой газете были карикатурно изображены представления, бытовавшие в разных отделах КБ, о вновь создаваемом самолете. Прочистам снился некоторый абсолют прочности, у оружейников отовсюду торчали пушки и пулеметы, двигателям снился процесс изготовления из досок, сбитых накрест одним гвоздем и т.д.

Однако созданный самолет весьма отдаленно напоминал эти сны, хотя делали его герои и персонажи стенгазеты. Это происходило потому, что во главе таких коллективов стояли выдающиеся инженеры, обладавшие развитой интуицией, позволявшей находить компромисс, гармонизировавший эти устремления. Каждое



Рис. 1. Первый отечественный серийный реактивный истребитель МиГ-9

специализированное подразделение стремилось к оптимальному решению своей задачи. Но такие частные решения не "суммируются" в единое целое. Приходится жертвовать оптимальными характеристиками частных функциональных возможностей для получения компромисса, в котором важно интегративное качество — самолет. Частные же свойства, снисвшие героям этой стенгазеты, по отдельности не обладали качеством самолета. Более того, в результате нахождения компромиссного решения эти частные свойства рассматривались уже как его следствия. Теперь не было двигателя как такового, не было конструкции как таковой, не было вооружения как такового, а был самолет, обладавший возможностью двигаться, выдерживать нагрузки и поражать цели. Все эти эффекты проявлялись теперь как различные стороны функционирования единой сущности — самолета.

Построение формализованного описания

Пример с истребителем МиГ-9 позволяет понять основную идею формализации и ее модельные возможности. Они связаны с необходимостью методической поддержки поиска компромиссного решения между тем, чем может располагать проектируемый объект, каковы могут быть характеристики его частей и тем, что от него требуется.

Совершенство исполнения технической системы определяется тем, насколько нагружены элементы ее конструкции в работе. Чем больше они взаимодействуют между собой при выполнении различных функций, тем более компактно реализован объект при условии выполнения заданного назначения в заданных условиях.

Это соображение наталкивает нас на необходимость исследования и разработки частей проектируемого изделия. В исследовательской и инженерной практике мы постоянно сталкиваемся с необходимостью декомпозировать объекты. Однако при системном исследовании (после изучения выделенных частей, которые могут рассматриваться как элементы) эта декомпозиция должна заканчиваться модельным воссозданием облика того целого, которое мы создаем. То есть мы должны не просто декомпозировать объект на части, но и определить факторы взаимосвязанности, взаимообусловленности частей как самим целым, его сущностью как вещи, так и другими составляющими его частями. И объяснить объект в це-

лом через их объяснимость и характеристику взаимосвязей. Это позволит найти компромисс между требованиями к частям, основанный на достижении интегративного качества, и самим этим качеством.

Обратим внимание на то, что самолет собирается из отдельных деталей. И многие методы, описанные в литературе, начиная от [4], исходили из того, что рассматривали их как элементарные части. Такое понимание вполне работоспособно для простых механизмов, например [2], в которых работают детали, участвующие в весьма ограниченном составе взаимодействий. То есть признаком элементарности при декомпозиции конструкции становится возможность описания и исследования взаимодействия проектируемой детали с другими и анализ ее участия в работе всего изделия. Но в сложных системах, в которых число деталей начинает исчисляться тысячами, десятками тысяч, для которых характерны разнообразные по своей природе виды взаимодействия, эти подходы оказываются практически неработоспособными. Попытка иерархического подхода, когда в качестве элементов рассматривают не детали, а агрегаты и сборки, также оказалась неработоспособной, поскольку не учитывались существенные связи между ними. В описанной выше стенгазете, в которой есть и доля шутки, выразительно показано, что такое "агрегатное" членение, попытка определить облик изделия через специализацию крупных частей нерезультативно. Таким образом, возникает проблема того, как декомпозировать вновь проектируемый объект, что выбирать в качестве его частей.

Выход состоит в переходе к функциональной декомпозиции. Стержнем описания проектируемого изделия становится схема его функционирования. При таком подходе уже в сложных системах удается "добраться" до функций, которые можно рассматривать как элементарные. И это становится основанием для синтеза операционной картины, при котором формируются и взаимодействия элементарных функций. Учитывая то, что число этих элементарных функций оказывается существенно меньше числа деталей, получаемых при членении конструкции, такой подход становится вполне работоспособным для сложных технических систем. Полученное же модельное описание, основанное на описании функций и их взаимодействия, становится основанием для разработки конструктивно-компоновочной схемы.

Однако одного лишь перехода к функциональной декомпозиции оказалось недостаточно для формирования подхода к построению системной модели. Необходимо, чтобы формируемая системная модель позволяла искать компромисс, обеспечивавший достижение интегративного качества.

Для этого в ней пришлось соединить два взгляда на создаваемое изделие:

- внешний: рассматривается система как единое целое, осуществляющее управляемое движение к цели;
- внутренний: мы отвлекаемся от движения системы к цели и рассматриваем взаимодействие ее час-

тей, обеспечивающее возможности для управляемого движения к цели.

Совмещая два этих взгляда, мы добиваемся такого соотношения частей разрабатываемого изделия и их взаимодействия, результатом которого становится целостное изделие, способное выполнять свое назначение в различных условиях. Таким образом, системное представление позволяет гармонизировать понимание частей создаваемого изделия и выполняемых ими функций.

Модель с двумя системами координат

Идея и схема сборки системной модели, которая позволяет описывать поведение объекта, совмещающее "внешний взгляд" на его функционирование с "внутренним", проиллюстрированы рис. 2.

Основными составными частями являются две одинаковые модели, в каждой из которых точкой в системе координат отображается управляемое движение объекта. При формировании единой модельной конструкции одна из них должна будет использоваться для описания "внешнего", а другая – "внутреннего" взгляда на работу объекта. В одной системе координат – "внешней", – точкой будет отображаться поведение объекта, рассматриваемого как целое изделие. В этой системе координат характеризуется состояние объекта по отношению к достигаемой цели. Отображающая точка описывает движение к заданной цели, осуществляемое под влиянием управляющих и возмущающих воздействий. В другой системе координат – "внутренней", – точкой отображается поведение объекта, рассматриваемого как совокупность его частей. В этой системе координат отображающая точка описывает изменения в функциональном состоянии объекта, являющемся результатом взаимодействия частей, которое осуществляется под влиянием управляющих и возмущающих воздействий. Функциональное состояние характеризует способность объекта обеспечить управляющие воздействия как в пространстве "внешних", так и в пространстве "внутренних" координат.

Формирование модельной конструкции осуществляется путем установления отношений между этими исходно одинаковыми динамическими моделями.

Первое отношение – это отношение координат. Для выполнения разных функций в общей модельной конструкции "комплектующие" модели должны быть конкретизированы, в силу чего они теряют исходную одинаковость. В них будут использованы разные множества измеряемых характеристик. Обязательным условием будет то, что эти множества не должны пересекаться.

Второе отношение – это отношение целей. Цель в пространстве "внешних" координат определяется назначением проектируемого объекта. А вот цель в пространстве "внутренних" координат уже является предметом компромисса. С одной стороны, как желаемое, она определяется исходя из тех функциональных возможностей, которые необходимы для достижения цели в пространстве "внешних" координат. С другой стороны,

Все идеи в науке рождались в драматическом конфликте между реальностью и нашими попытками ее понять.

А. Эйнштейн

ее желаемое значение может оказаться недостижимым на основе располагаемых функциональных возможностей. То есть полученная модельная конструкция позволяет описывать противоречие между тем, что требуется и тем, что имеется – располагаемыми функциональными возможностями. А значит, она позволяет находить компромисс между ними.

Учитывая то, что в данной модельной конструкции поведение объекта отображается движением двух точек в двух системах координат, будем называть ее "моделью с двумя системами координат", дабы отличать ее от составляющих динамических моделей, построенных каждая в своей и единственной системе координат.

Полученной модельной конструкции соответствует следующий вид математической записи

$$\begin{aligned}
 &F_X(X) - F_X(\tilde{X}) = 0 \\
 &dF_X/dt = f_F^X[w(X, t); r(U(X, Y, t))] \\
 &dX_1/dt = f_1^X[w(X, t); r(U(X, Y, t))] \\
 &dX_2/dt = f_2^X[w(X, t); r(U(X, Y, t))] \\
 &\dots \\
 &dX_n/dt = f_n^X[w(X, t); r(U(X, Y, t))] \quad (1) \\
 &F_Y(X) - F_Y(\tilde{Y}) = 0, \text{ где } \tilde{Y} = f_{tl}[X - \tilde{X}, w(X, t), w(Y, t)] \\
 &dF_Y/dt = f_F^Y[w(Y, t); r(U(X, Y, t))] \\
 &dY_1/dt = f_1^Y[w(Y, t); r(U(X, Y, t))] \\
 &dY_2/dt = f_2^Y[w(Y, t); r(U(X, Y, t))] \\
 &\dots \\
 &dY_m/dt = f_m^Y[w(Y, t); r(U(X, Y, t))]
 \end{aligned}$$

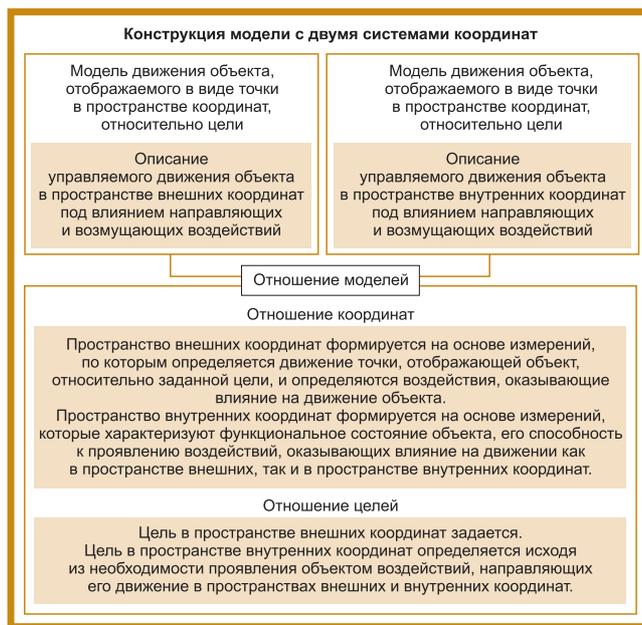


Рис. 2. Схема формирования модели с двумя системами координат

Проектирование и конструирование космического аппарата

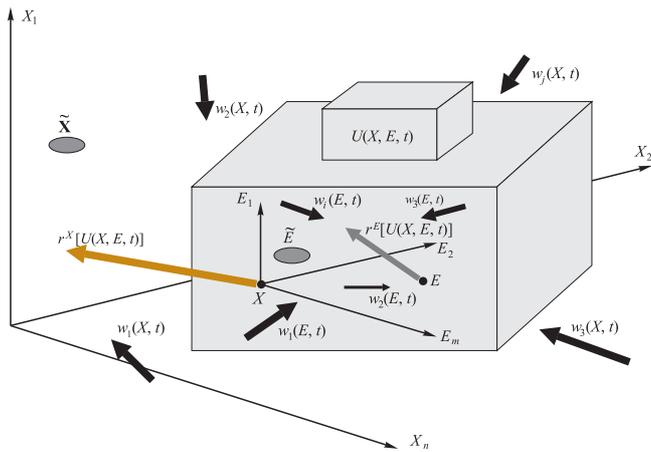


Рис. 3. Схема формирования модели с двумя системами координат

Здесь F_X, F_Y – целевые функции в пространствах внешних и внутренних координат, $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ – радиус-вектор, отображающий положение объекта в пространстве внешних координат, $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ – радиус-вектор, отображающий положение объекта в пространстве внутренних координат, n и m – размерности этих пространств, \tilde{X}, \tilde{Y} – координаты, характеризующие достигаемую точку или область в пространствах внешних и внутренних координат соответственно, $w(X, t), w(Y, t)$ – факторы хода событий, оказывающие возмущающее воздействие на объект в пространствах внешних и внутренних координат соответственно, $r[U(X, Y, t)]$ – множество функций объекта, t – время, $f_F^X, f_F^Y, f_1^X, f_2^X, \dots, f_n^X, f_1^Y, f_2^Y, \dots, f_m^Y, f_{II}$ – функции общего вида, конкретная запись которых определяется задачей моделирования.

Отметим, что в записи (1) характеристика цели представлена в простейшем виде. Использование более сложных видов записи целевых условий принципиально не вносит изменений в смысловые моменты.

Запись (1) может быть проиллюстрирована следующей схемой (рис. 3).

Теперь ясно представляется как родство моделей с одной и двумя системами координат, так и их отличие, выделяющее последние в отдельный класс. Родство состоит в том, что в основе моделей лежит отображение положения объекта точкой в системе координат. Отличие – в содержательных возможностях модели с двумя системами координат. Ее конструкция допускает описание внешних проявлений описываемого объекта в зависимости от его функционального состояния и управление функциональным состоянием в соответствии с потребностями движения к заданной цели.

Такой подход позволяет поддерживать решение по управлению объектом, представляющее собой компромисс между тем, что требуется, фиксируемым в пространстве "внешних" координат, и тем, что возможно, фиксируемым в пространстве "внутренних" координат. Подробное описание этой модели представлено в [5].

Выше было отмечено, что совершенство создаваемого объекта достигается использованием элементов его конструкции в различных вариантах функционального нагружения. Чем больше каждый элемент "берет на себя", чем больше он совмещает в своей работе взаимодействий с другими элементами, тем компактнее и надежнее будет создаваемая система. Каждый раз, когда возникает противоречие между желаемым и возможным, решение состоит не в добавлении нового элемента в конструкцию, а в поиске вариантов взаимодействий существующих элементов.

Так, первоначальное конструктивно-компоновочное решение МиГ-9 состояло в том, что двигатели располагались на крыльях. Однако идея по их расположению внутри фюзеляжа позволила существенно улучшить характеристики самолета. Было уменьшено лобовое сопротивление, снижен расход топлива и повышены скоростные характеристики. Придание фюзеляжу дополнительных функций обтекателя двигателей и снятие с крыльев нагрузки от двигателей позволили также получить выигрыш в массе.

Еще одним примером такого совмещения является переход в ракетах с подвесных баков на несущие. Наддув, необходимый для обеспечения питания двигателей, одновременно используется и для разгрузки оболочки баков. То есть наддув обеспечивает подачу топлива и разгружает большую часть конструкции ракеты одновременно.

Создавая конструкцию космического аппарата необходимо выполнять множество противоречивых требований. Требования к рабочей ориентации приборов, реализующих назначение космического аппарата (например, зондирование земной поверхности), выполняемые как за счет их компоновки, так и за счет определенной динамики полета, конфликтуют с аналогичными требованиями к солнечным батареям, радиатору-теплообменнику, антеннам для радиосвязи с Землей и т.д.

Основным способом разрешения этих противоречий и нахождения требуемого компромисса становится анализ схемы функционирования. С помощью представленной модели можно анализировать ход и совместимость выполнения разнообразных функций, выполняемых космическим аппаратом в полете.

В этой модели космический аппарат представляется как комплексный алгоритм, осуществляющий управление ходом достижения цели полета. Характеристики, на основе которых определяются конструктивное устройство аппарата, параметры его приборов и агрегатов, являются коэффициентами, описывающими конкретные особенности этого комплексного алгоритма. Испытания на модели позволяют выявить конфликты, когда для какой-либо из функций начинает не хватать ресурсов, располагаемых космическим аппаратом, и соответственно анализировать пути

предотвращения возникновения нештатной ситуации за счет развития этого противоречия. В первую очередь это достигается усложнением этого комплексного алгоритма.

Этот метод был успешно применен при описании ряда технических и организационно-технических систем, что позволяет рассматривать его как новый подход к построению системных моделей.

Статья написана в ходе выполнения работ по госконтракту № 02.740.11.0469 в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг."

Список литературы

1. Месарович М. Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978.
2. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. М.: Машиностроение. 1984.
3. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия. М.: Прогресс. 1971.
4. Гуд Г.-Х., Макол Р.-Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем. Пер. с англ. М.: Сов. радио. 1962
5. Бахур А.Б. Совершенствование методической схемы проектирования космических аппаратов на основе положений биокибернетики // Двойные технологии. 2009. № 2.

Бахур Андрей Борисович — канд. техн. наук, главный специалист "НИИ Космических систем имени А.А. Максимова" — филиала ФГУП "ГКНПЦ им. М.В. Хруничева".

Контактный телефон (495) 543-38-68.

E-mail: a.bakhur@mail.ru

О ПОИСКЕ КОМПРОМИССА

В.Н. Новосельцев (ИПУ РАН)

Современные технические системы представляют собой сложные комплексы, состоящие из десятков тысяч узлов и деталей. Их проектирование давно превратилось в отрасль знания, требующую системного мышления, анализа спектра целей, реализуемых системой, учета многочисленных ограничений, поиска компонент и материалов и, наконец, разработки адекватных систем управления. По мере усложнения создаваемых систем наука накопила и продолжает накапливать знания и методы работы, способы создания моделей и их анализа. За последние десятилетия была создана специфическая методология моделирования таких систем, так что автор не совсем прав, утверждая, что "общепризнанной методологии системного моделирования" не существует. Однако он абсолютно прав, говоря о том, что решение задачи о компромиссе между отдельными составляющими сложных технических систем, таких как космические аппараты, сегодня отсутствует.

Конечно, методы поиска компромисса между отдельными частями сложных технических (как, впрочем, и биологических, и социальных) систем существуют — взять хотя бы развитую область многокритериальных систем [1] или работы по системам с прогнозированием [2], позволяющим предвидеть возникновение "узких мест" в процессе управления. Существует и теория синтеза координирующих систем управления, разработанная Л.М. Бойчуком [3]. Однако статья А.Б. Бахура выгодно отличается тем, что в ней в явном виде сформулирован основной принцип проектирования сложных систем управления — необходимость адекватного разрешения противоречия между тем, что система может делать и тем, что она должна делать для достижения поставленной цели.

Это достигается путем одновременного анализа поведения проектируемой системы в двух "пространствах координат" — внешних, характеризующих воз-

можность и близость к достижению заданной цели, и внутренних, определяющих текущее состояние системы. Такой подход можно считать расширением классического подхода, в котором ограничения на поведение системы задаются в виде неравенств. В результате появляется возможность прямого разрешения конфликта между "внешними" характеристиками системы, необходимыми для достижения цели, и "внутренним" функциональным состоянием системы, поскольку жесткие ограничения теперь могут анализироваться более детально.

Такой подход, по всей видимости, восходит к биологическим системам, в которых управление осуществляется сложными и гибкими алгоритмами. В частности, контроль и слежение за состоянием тела человека осуществляется с участием особых проприоцептивных систем, выводящих в процессе достижения "двигательной" цели текущую информацию о состоянии различных мышц на уровень сознания [4]. Эти системы поставляют центральный управляющим механизмам в мозгу человека данные о положении тела, движении мышц и о силах, действующих в процессе достижения поставленной цели. Именно на основании проприоцептивных механизмов в организме создается единая "двигательная" модель тела, позволяющая человеку нормально жить и заниматься различными видами деятельности.

Можно поэтому ожидать, что развитие идей, высказанных в статье А.Б. Бахура, приведет к существенному продвижению в построении системных моделей движущихся объектов, позволяющих еще на этапе проектирования избегать "узких мест" в процессе функционирования сложных систем различной природы. Хотелось бы отметить, что среди сложных объектов, которым посвящена эта статья, наряду с космическими аппаратами находится и другая, не менее интересная, сложная и многочис-