

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В. В. Шмелев^а, канд. техн. наук

М. Ю. Охтилев^б, доктор техн. наук, профессор

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Введение: качество управляющего алгоритма технологического процесса в предметной области функционирования ракетно-космической техники и обработки и анализа измерительной информации определяется не только результатами тестирования алгоритма, но и способом описания алгоритма. Простая и в то же время полностью адекватная предметной области модель технологического процесса является инструментом описания управляющего алгоритма, в значительной степени повышающим его качество. Одним из перспективных направлений в моделировании технологических процессов является применение структурно-логического подхода. **Цель:** классифицировать известные подходы к моделированию технологических процессов с учетом особенностей предметной области, выявить их достоинства и недостатки на примере практических внедрений. **Результаты:** с позиции классического определения динамической системы технологический процесс в предметной области в общем случае является нестационарным конечномерным нелинейным процессом с дискретным временем. На основе этого представлена классификация известных подходов к моделированию процессов по четырем группам: функциональной, алгебраической, темпоральной и структурной. Интерпретация подходов сопровождается показательными примерами их прикладной реализации в космической отрасли Российской Федерации с указанием достоинств и недостатков. Рекомендуется этапность выбора (создания) модели технологического процесса. Структурно-логический подход классифицирован как симбиоз комплексного, логико-алгебраического и логического подходов. **Практическая значимость:** полученные результаты целесообразно применять для повышения качества квалиметрии разрабатываемого читателями подхода к моделированию технологических процессов, для обоснования выбора среди известных подходов к моделированию технологических процессов, для определения актуальности и перспективности теоретических и практических исследований в области разработки и совершенствования специального программного обеспечения мониторинга технологических процессов в предметной области.

Ключевые слова — ракетно-космическая техника, моделирование технологических процессов, квалиметрия моделей, структурно-логический подход.

Введение

При создании и эксплуатации современной ракетно-космической техники (РКТ) широко применяется вычислительная техника. Наиболее сложной и недостаточно формализованной является проблема автоматического (автоматизированного) управления технологическими процессами различного назначения: подготовкой и пуском ракеты-носителя в автоматизированном режиме, функционированием систем ракеты-носителя на активном участке траектории в автоматическом режиме, работой систем космического аппарата в автоматическом и автоматизированном режимах, обработкой и анализом измерительной информации по результатам испытаний и применения РКТ.

С позиций системного анализа управление можно рассматривать как совокупность циклических операций измерения, обработки и анализа результатов измерений, формирования и выдачи управляющих воздействий. Особенностью работы именно космической техники является тот факт,

что зачастую управляющее воздействие не является одноактным действием. Автоматической (автоматизированной) системой управления формируется целый комплекс операций, направленный на достижение требуемого эффекта. Поэтому управляющее воздействие в данной предметной области можно назвать технологическим процессом, осуществляемым по управляющему алгоритму [1]. Управляющий алгоритм — это строгая последовательно-параллельная совокупность действий по переводу технического процесса из начального в конечное состояние с требуемым показателем качества. Практической реализацией алгоритма является программа — специальное программное обеспечение.

Сегодня проблема создания управляющих алгоритмов надлежащего качества в требуемые сроки перешла из плоскости сложности аппаратной реализации на борту в плоскость сложности программно-алгоритмической реализации. Это вызвано возрастанием многоаспектной сложности процессов функционирования РКТ и все расширяющейся реализацией алгоритмов управления

в цифровом виде в бортовых цифровых вычислительных машинах [2].

В основе управляющего алгоритма лежит модель управляемого технологического процесса. При этом конечная результативность управляющего воздействия в немалой степени зависит и от качества алгоритма, и от используемой модели технологического процесса. Например, процедура динамического программирования — это общепризнанный по эффективности алгоритм решения оптимизационной задачи. Однако использование аналитической модели (например, в виде системы уравнений) при описании алгоритма значительно затрудняет применение метода динамического программирования, а иногда делает его невозможным. Известно, что для применения такого метода лучше всего подходят логико-алгебраические модели [3].

Управляющий алгоритм для технологического процесса, с одной стороны, сам является информационным объектом, не имеющим физической (материальной) сущности. С другой стороны, в разработке современное алгоритмическое обеспечение технологических процессов является чрезвычайно сложным и трудоемким видом технических изделий. Поэтому использование совершенной модели, как можно более простой, но адекватной управляемому процессу, позволит значительно сократить трудозатраты и затраты других видов ресурсов при создании управляющих алгоритмов.

В статье предложена классификация известных подходов к моделированию технологических процессов с конкретными примерами прикладной реализации. Дополнительно к известным в классификации участвует разработанный авторами структурно-логический подход к моделированию технологических процессов в предметной области, подробно изложенный в работе [4].

Определение технологического процесса в предметной области как динамической системы

Для анализа существующих подходов к моделированию технологических процессов необходимо привести определение технологического процесса с учетом особенностей предметной области испытаний и применения РКТ. Рассматриваемый технологический процесс является динамической системой, поэтому целесообразно трансформировать классическое определение, приведенное в работе [5].

Технологическим процессом в общем случае называется кортеж

$$\Sigma = \langle T, X, U, \Omega, Y, \Lambda, \mu, \eta \rangle, \quad (1)$$

где:

— $T \subseteq R$ — упорядоченное множество моментов времени, на котором развивается технологи-

ческий процесс. Следует отметить возможность развития процесса не только во времени — существуют так называемые событийные процессы. При этом в качестве элементов множества T используются имена событий (или их номера), линейно упорядоченные по порядку наступления;

— X — множество состояний процесса, каждое состояние — вектор значений характеристик процесса, например, степень выполнения, потребляемые ресурсы;

— U — множество значений входных (управляющих) воздействий на органы управления процессом;

— $\Omega = \{\omega : T \rightarrow U\}$ — набор функций входных воздействий, который можно определить как «временную программу» управления процессом;

— Y — множество выходных величин, используемых для наблюдения за состоянием процесса. Так как в явном виде наблюдать за состоянием процессов функционирования объектов РКТ в подавляющем большинстве случаев нельзя, то в общем случае $X \neq Y$;

— $\Lambda = \{\lambda : T \rightarrow Y\}$ — набор функций порождения выходных величин;

— $\mu : T \times T \times X \times \Omega \rightarrow X$ — переходная функция состояния процесса;

— $\eta : T \times X \rightarrow Y$ — выходное отображение, определяющее поток выходных величин и позволяющее однозначно сопоставить конкретному состоянию процесса конкретное значение выходной величины.

Классифицируем технологический процесс в предметной области.

Процесс будет стационарным в случае, если:

— Ω замкнуто относительно оператора сдвига $z^\tau : \omega \rightarrow \omega'$, определяемого соотношением $\omega'(t) = \omega(t + \tau)$, $\forall t, \tau \in T$, что означает повторяемость программы управления процессом;

— $\forall s \in T : \mu(t; \tau, x, \omega) = \mu(t + s; \tau + s, x, z^s \omega)$, что означает равенство переходной функции состояния процесса для моментов времени, отстоящих на некоторую величину, которую можно назвать периодом;

— отображение η не зависит от t , что означает единственность выходных величин процесса для одного и того же состояния процесса, даже в разные моменты времени.

Анализ технологических процессов функционирования систем РКТ позволяет сделать вывод о том, что в подавляющем большинстве такие процессы не являются стационарными. Несомненно, есть возможность ограничить T таким образом, что в выбранном интервале будут выполняться условия стационарности процесса. Однако это не позволит создать унифицированный методический инструмент моделирования

и ограничит совместимость моделей различных этапов функционирования РКТ.

Технологический процесс называется процессом с непрерывным временем, если $T = R$, и с дискретным, если $T = N$, где R и N — множество вещественных и натуральных чисел.

Причиной однозначного отнесения процессов в рассматриваемой области к дискретным процессам следует назвать принцип получения информации о состоянии технологического процесса, т. е. технической реализации отображения η . Для получения информации о технологическом процессе при испытаниях и применении РКТ создана система информационно-телеметрического обеспечения. Принцип сбора измерительной информации в данной системе заключается в формировании совокупности пар $\langle y, t \rangle$, где y — измеренное значение выходной величины Y ; t — момент времени измерения выходной величины Y , $t \in T$. Формирование указанных пар может осуществляться с постоянным периодом (называемым периодом опроса измерительной системы) в случае жесткого принципа сбора измерений или с непостоянным в случае адаптивного принципа сбора измерений.

Процесс называется конечномерным размерности $\dim \Sigma$, если X является конечномерным линейным пространством размерности $\dim X_{\Sigma}$. Процесс будет конечным, если X конечно.

Размерность элементов x множества X определяется суммарным количеством оцениваемых параметров состояния процесса. Очевидно, что указанное количество всегда может быть точно определено. Поэтому процесс конечномерный. На практике путем применения процедуры агрегирования (объединения близких по различным критериям состояний x множества X) обеспечивают конечность процесса. Процедура агрегирования заключается в введении интервалов на значения элементов множества X , в пределах которых различные по значениям x состояния объединяются в единое по фактической интерпретации агрегированное состояние. Примером является задание на параметры РКТ допусковых границ, отделяющих исправное состояние от неисправного.

Технологический процесс является линейным, если:

- X, U, Ω, Y и Λ являются векторными пространствами на произвольном поле K ;
- отображение $\mu(t; \tau, \cdot, \cdot)$ является K -линейным для любых t и τ ;
- отображение η является K -линейным для любых t .

Условие векторного характера пространств X, U, Ω, Y и Λ сомнению не подлежит вследствие конечномерности процесса, что было показано ранее. Однако остальные условия линейности

отображений $\mu(t; \tau, \cdot, \cdot)$ и η являются на практике в общем случае невыполнимыми.

Технологический процесс является гладким, если:

- $T = R$;
- X и Ω являются топологическими пространствами;
- $\mu \in C^1(T \rightarrow X)$, т. е. переходная функция μ является некоторым дифференциальным уравнением.

Условие гладкости не выполняется вследствие ранее принятой дискретности технологических процессов функционирования РКТ.

Таким образом, технологический процесс испытаний и эксплуатации РКТ, обработки и анализа измерительной информации является нестационарным конечномерным конечным нелинейным процессом с дискретным временем.

Классификация известных подходов к моделированию технологических процессов

Рассмотрим основные подходы к моделированию процессов: проведем их классификацию, сформируем и определим признаки сравнения, приведем примеры прикладной реализации подходов. Классификацию подходов к моделированию приведем в виде древовидной структуры (рис. 1) [6, 7].

Целесообразно выделить четыре группы подходов.

Первая группа — *алгебраическая* — основана на описании взаимодействующих процессов. Здесь процессы строятся на базисе атомарных операций с помощью набора алгебраических операций. Слово «алгебра» означает, что используется алгебраический/аксиоматический подход для описания поведения процесса. Алгебра процессов — это любая математическая структура, удовлетворяющая системе аксиом, описывающих требуемые свойства основных операторов. «Операция» в таком случае рассматривается как базовый элемент алгебры процессов.

Группа, объединяющая математические подходы, названа *функциональной*. В основе подходов данной группы находится преимущественное применение математических формализмов — функциональных зависимостей, определяющих текущее состояние моделируемого процесса как функции от аргументов различного рода. В качестве аргументов могут выступать время, ресурсы и другие величины. При этом может конструироваться целая система уравнений различной сложности.

Третья группа — это группа подходов, основанных на *темпоральной* (временной, событийной, пошаговой) логике. При этом в качестве



■ Рис. 1. Классификация подходов к моделированию процессов

модели процесса используется конечная система переходов. В качестве интерпретации процесса в этом случае применяется формула темпоральной логики линейного или ветвящегося времени (кортежа событий для событийных процессов).

При необходимости представления не траектории процесса, а смысловой причинно-следственной связи между операциями процесса используются подходы *структурной* группы.

Материальные подходы, позволяющие создать материальные (реальные) модели, не являются предметом рассмотрения в данной статье. Идеальные (абстрактные) подходы достаточно условно можно разделить по типам на формализованные и неформализованные (вербальные). В приведенных далее примерах подходов отдельные стороны содержания можно рассматривать и как систему традиционных математических представлений (**формализованный** тип), и как совокупность вербальных выражений на некотором языке (**неформализованный** тип).

Примерами *простейшего знакового* подхода к моделированию технологических процессов являются таблицы хронометража, диаграммы

Ганта, технологические графики. Данный способ основан на простейших математических выражениях — системе рекурсивных функций. В работе [4] показано, что такой способ обладает крайне ограниченной моделирующей мощностью.

Сложные знаковые подходы могут быть разделены на алгебраические, в которых используются конструкции математической логики (алгебры) или языковые конструкции (лингвистика) и математические, в которых используются только традиционные математические представления.

К *алгебраической* группе можно отнести следующие подходы.

Логико-алгебраический подход оперирует терминами процесса (этапами или состояниями процесса) и элементарными операциями (логическим сложением, умножением, отрицанием). Элементарной операцией может являться функция перехода, не имеющая математической интерпретации и определяющая детерминированную смену значения состояния процесса. Обобщенными примерами моделей, созданных в соответствии с логико-алгебраическим подходом, можно назвать конеч-

ные автоматы, сети Петри с их модификациями: G-сети [8], ВРС-сети (сети временных расстановок событий) [9], триады [10].

Инструмент конечных автоматов в практике представления технологических процессов функционирования РКТ встречает затруднения вследствие использования идеологии состояний, а не переходов, что при многообразии и многовариантности состояний технологических процессов слишком ресурсоемко.

Сети Петри и их модификации показали хорошую применимость для рассматриваемой предметной области. Примером успешного практического применения логико-алгебраического подхода (а именно G-сетей) является система анализа измерительной информации в автоматизированной системе управления подготовкой и пуском ракеты-носителя «Союз-2», развернутой, в частности, на космодроме «Плесецк» [2].

Логико-лингвистический подход [6] основан на конструкции формальных языков, состоящей из терминальных элементов, правил вывода и нетерминальных элементов. В этом случае технологический процесс описывается с помощью множества переменных высказываний {операция X выполняется, приостановлена, окончена и другие варианты состояния операции}, являющихся терминальными элементами, из которых составляются предложения о текущем состоянии процесса. Развитие процесса в этом случае описывается правилами вывода, определение текущего состояния — процедурой грамматического разбора информационных предложений. На основе логико-лингвистического подхода было создано унифицированное программное обеспечение автоматизированного анализа технического состояния РКТ «Байкал» [6]. Однако подобные модели нашли только ограниченное применение в рассматриваемой предметной области вследствие сложности интерпретации результатов вывода, т. е. получения новой информации и ее сопоставления с реальным состоянием моделируемого процесса.

Математические подходы следует разделить на аналитический, имитационный и комбинированный (аналитико-имитационный или комплексный).

Модель, созданная с помощью аналитического подхода, охватывает определенный аспект моделируемого технологического процесса посредством тех или иных математических конструкций (функций, функционалов, алгебраических или дифференциальных уравнений и т. д.). Такая модель позволяет получить конечные характеристики процесса (степень выполнения, затраченные ресурсы и т. п.) в виде некоторых формальных соотношений для количественного или качественного анализа. Показательными

представителями аналитических моделей технологических процессов можно назвать модели непрерывной системной динамики, в частности на основе дифференциальных уравнений в той или иной форме [7]. В таких уравнениях в левой части находится переменная, отражающая какую-либо характеристику технологического процесса. В правой части представляется математическое выражение, содержащее аргументы времени, ресурса и т. д.

Достоинством аналитической модели является ее строгость и точность, позволяющие уточнить состояние процесса в любой момент, но только в случае достаточной адекватности модели реальному процессу. Недостатком такого способа моделирования технологических процессов следует назвать трудность представления логических взаимосвязей между операциями. Кроме того, недостаточно адекватно возможно передать особенности дискретного течения моделируемого процесса.

Имитационный подход к моделированию имеет распространение в области исследований технологических процессов [11]. Он применяется, когда есть необходимость идентифицировать поведение процесса при изменяющихся условиях. В своей сути имитационный подход содержит этап построения концептуальной (вербальной) модели процесса, этап алгоритмического описания последовательности элементарных или агрегированных операций и этап имитационных экспериментов, при проведении которых вносятся возмущения в условия выполнения процесса. Примером имитационной модели технологического процесса можно назвать многоразовое выполнение фрагмента (упрощенной) аналитической модели в рассмотренной ранее постановке. При этом в правой части уравнения состояния технологического процесса вводится переменная, определяемая факторами неопределенности с соответствующими статистическими характеристиками.

Основным достоинством имитационного подхода является возможность отражения адекватным образом несложной логики развития технологического процесса. Недостатком имитационного подхода является сложность интерпретации получаемых результатов или сложность придания фундаментальности выводам, которые значительно уступают фундаментальности выводов, получаемых при использовании аналитического подхода.

Для преодоления недостатков аналитического и имитационного подходов к моделированию широко развивается аналитико-имитационный или комплексный подход [12]. Отличительной особенностью такого подхода является введение типовой аналитической модели, представляющей

собой модель (сеть моделей), получившую определенную теоретическую проработку и обладающую достаточной степенью общности или универсальности. Введение подобных моделей позволяет, с одной стороны, унифицировать процесс построения алгоритмической имитационной модели, с другой стороны, получить фундаментальные результаты аналитической модели.

Представителей комплексного подхода к моделированию в настоящее время огромное количество. При рассмотрении методов комплексного моделирования принято говорить [13] об агрегатных моделях Бусленко Н. П., непрерывно-дискретных моделях Глушко В. М. и гибридных моделях. Однако, во-первых, показано [13], что данные модели приводятся друг к другу. Во-вторых, эти модели не являются в чистом виде самостоятельными, они определяют принцип глобального описания динамической системы или технологического процесса. Для прикладного применения таких моделей необходимо использовать соответствующие подмодели: в модели Бусленко — подмодель агрегата, в модели Глушко — подмодель процесса, в гибридной модели — подмодель гибридного автомата, чаще всего сетевого типа. Поэтому использовать такие модели в виде отдельных типов для классификации не следует, необходимо рассматривать их прикладные реализации.

Выделяются дискретные модели с сетевой структурой (прикладные разработки, например, в работах [8–10]), комплексные непрерывные модели системной динамики [14]. Все данные типы моделей объединяет использование некоторого унифицированного элемента (возможно, множества элементов), на основе композиции которых и создается искомая модель процесса. Достоинства и недостатки комплексных моделей в значительной степени определяются характеристиками унифицированного элемента.

Так, комплексные модели системной динамики в своей основе используют элементарные конечно-разностные или дифференциальные уравнения, связываемые между собой и образующие своеобразную динамическую сеть. Поэтому основным недостатком таких моделей является ограниченность моделирующей мощности. Достоинства же соответствуют достоинствам аналитических моделей.

Несмотря на то, что модели с сетевой структурой ранее уже относились к моделям, созданным в соответствии с логико-алгебраическим подходом, сетевые структуры возможно представить и в группе комплексного подхода при их рассмотрении с позиции использования технологии агентов. Данная технология подразумевает составление из конструктива сетевой структуры некоторого более крупного объекта, обладаю-

щего синергетическими свойствами, отсутствующими у элементов конструктива. Подобная технология реализуется достаточно просто именно с помощью моделей с сетевой структурой. Широкое прикладное применение такого подхода в системах комплексного (хотя и называемого в описаниях имитационного) моделирования доказывает его хорошую практическую направленность. Распространенными средами комплексного моделирования с CASE-средствами следует назвать AnyLogic, GPSS World, Rand Model Desinger.

Дискретные модели с сетевой структурой представляются наиболее результативными для использования в предметной области функционирования РКТ. Достоинствами моделей с сетевой структурой следует назвать наиболее полное соответствие типу моделируемых процессов. Очевидно, что дискретность и конечномерность модели уже лежат в основе сетевых моделей, состоящих из отдельных элементов (вершин и дуг). Множество возможных вариантов дуг и вершин реализуют нелинейность и нестационарность процесса.

Однако такие модели имеют и недостатки. Они заключаются в необходимости агрегирования, в общем случае, бесконечного числа состояний любого процесса, т. е. приведения его к конечному виду. Иначе громоздкость модели затмит все достоинства. Кроме того, существующие сетевые модели требуют особой доработки при важности учета времени.

Основным предназначением **неформализованного** (вербального) подхода является первоначальное изучение моделируемого процесса в целях дальнейшего, более качественного моделирования с использованием уже формализованной модели. И в отдельном виде вербальный подход не применим для установления показателей свойств моделируемого процесса. Кроме того, возможным является одновременная классификация подхода и среди сложных знаковых типов, и среди вербальных типов. Подобная одновременная классификация позволит более глубоко выяснить предназначение и особенности того или иного подхода к моделированию.

Неформализованные подходы следует разделить на **концептуальные** и **неструктурированные** на естественном языке. Предназначение последних — предварительное представление моделируемого процесса в виде мысленной модели. Задача концептуальных — первоначальное представление процесса, на котором следует остановиться подробнее и привести примеры использования в предметной области.

Концептуальный подход позволяет создать модель, отражающую с необходимой полнотой процесс-прототип в том или ином содержательном

его аспекте и записанную на естественном языке с использованием наивной логики. Различают дескриптивный и прескриптивный подходы к моделированию. *Дескриптивный* концептуальный подход создает модели описательного характера, *прескриптивный* концептуальный — модели нормативного, более строгого характера.

Результатом применения дескриптивного концептуального подхода можно назвать онтологическую модель, в соответствии с которой технологический процесс представляется в структурированном иерархическом виде классов и экземпляров классов, среди прикладных разработок можно назвать среду МИВАР. В предметной области онтологическая модель используется в системе комплексного анализа результатов применения космической техники на космодроме «Плесецк». Для удобства представления моделируемых процессов создана иерархия процесса функционирования ракеты-носителя по структуре: класс — экземпляр класса. Классы не являются одноранговыми элементами. Такой подход является удобным не для контроля и управления процессом, а для хранения больших объемов информации.

Еще одним примером дескриптивного подхода можно назвать представление процессов с помощью теоретико-множественных кортежей. В этом случае технологический процесс сопоставляется кортежу множеств и отношений. При этом множества содержат агрегированные состояния технологического процесса, характерные признаки состояний, а отношения определяют условия перехода процесса из одного состояния в другое. Примером можно назвать [15] модель процесса диагностирования технической системы, состоящую из σ -алгебры фазовых состояний процесса диагностирования, множества диагностических признаков и множества интервалов диагностических признаков, определяющих каждый искомый результат. Такая модель нашла достаточно широкое распространение у А. К. Дмитриева и его учеников для представления процессов анализа телеметрической информации в ракетно-космической отрасли.

Достоинством представления процесса с помощью теоретико-множественного кортежа, на первый взгляд, можно назвать обширнейшую моделирующую мощност. Однако это на самом деле является главным недостатком подхода. Так как практическое применение такого подхода к реальным технологическим процессам сталкивается с лавинообразным увеличением мощности множеств, превышающим вычислительные возможности ЭВМ. Поэтому теоретико-множественную модель целесообразно использовать лишь как вспомогательную или, как уже говорилось, предварительную модель.

Прескриптивные подходы можно разделить на характеристический и логический. Характеристический подход — это достаточно строгий способ описания не траектории развития процесса, а структуры его характеристик, целей, функций или задач. Прескриптивный логический подход позволяет получать менее формализованные варианты сетевых структур.

Примерами использования характеристического подхода являются дерево целей и задач и дерево показателей [7]. Дерево целей и задач — это нисходящий древесный граф: вершины высшего уровня по отношению к вершинам нижестоящего уровня рассматриваются как цели, вершины нижестоящего уровня по отношению к вершинам высшего уровня рассматриваются как задачи, которые необходимо решить для достижения этих целей. Множественность и иерархическая упорядоченность целей и задач, выполняемых процессом, предопределяет необходимость использования при оценивании его эффективности векторных показателей. Для систематизации показателей используется соответствующее дерево, где каждая вершина характеризует степень либо качество выполнения соответствующих частных задач или достижения поставленных целей.

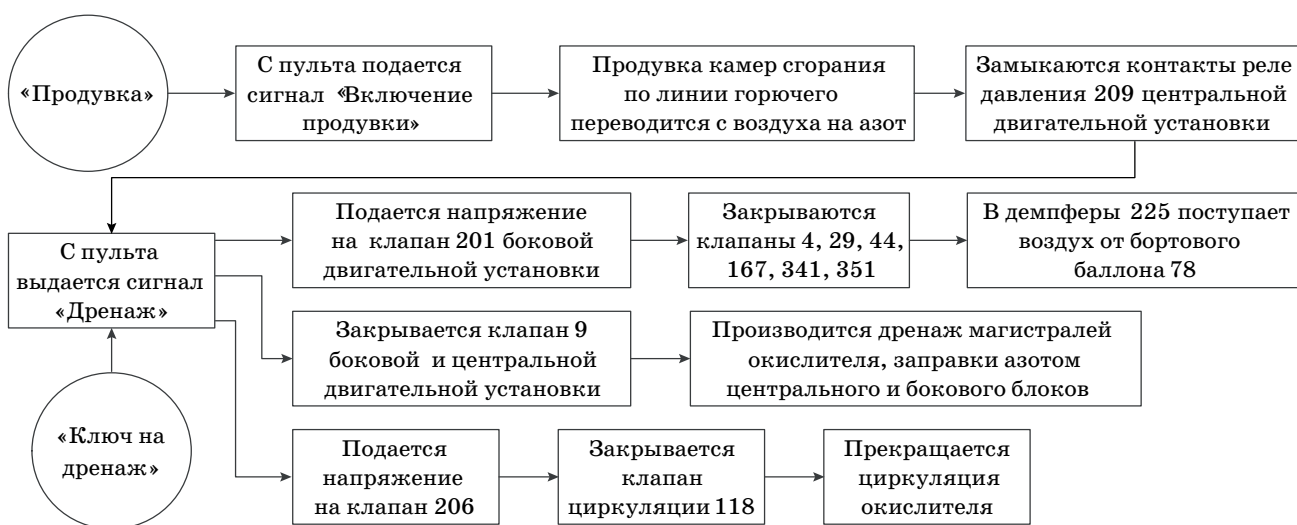
Логические прескриптивные подходы формируют модели, использующие графовый аппарат, однако без математических формализмов. Примером такой модели можно назвать циклограмму логического функционирования бортовой аппаратуры ракеты-носителя, фрагмент которой показан на рис. 2.

Такие модели всегда являются совокупностью графических элементов, которую в общем случае можно назвать N -дольным ориентированным графом. Дольность графа определяется количеством типов вершин. В циклограммах логического функционирования бортовых систем обычно вершины двух типов, одна из которых обозначает моменты ввода внешней информации (управляющих воздействий), вторая определяет состояния бортовой системы. Дуги определяют направление развития процесса функционирования.

Представленные структуры (и характеристические, и логические) являются вспомогательными инструментами для более эффективного выбора основного подхода к моделированию технологического процесса из группы сложных знаковых.

На основе приведенного определения технологического процесса испытаний и эксплуатации РКТ, обработки и анализа измерительной информации можно предложить следующую этапность создания модели процесса.

1. На первом этапе необходимо создать предварительную модель технологического процесса с помощью, например, теоретико-множественного



■ Рис. 2. Циклограмма логического функционирования бортовой системы ракеты-носителя (фрагмент)

подхода. Такой подход хорошо адаптируется для моделирования нестационарных, нелинейных процессов с дискретным временем, так как множества и отношения между ними требуют минимума математических формализмов.

2. С целью обеспечить прикладной характер формируемой модели процесса необходимо построить дерево целей и задач моделируемого процесса, а также дерево показателей эффективности данного процесса.

3. Затем в целях восстановления логических этапов выполнения процесса следует создать, например, циклограмму логического функционирования технологического процесса испытаний и эксплуатации РКТ, обработки и анализа измерительной информации. При этом необходимо использовать графовый аппарат.

4. На заключительном этапе среди сложных знаковых подходов следует выбрать симбиоз математических и алгебраических подходов, содержащий максимальное число положительных сторон составляющих.

Это является только указанием направления поиска требуемого подхода к моделированию. Для уточнения подхода необходимо провести квалиметрию моделей, формируемых сложными знаковыми подходами.

Приведенная классификация подходов к моделированию технологических процессов в предметной области не должна считаться исключительной. В классификации представлены только основные общеизвестные способы и подходы. Кроме того, как уже говорилось, но вследствие важности замечания целесообразно еще раз отметить, что наиболее эффективное применение подходов требует их симбиоза.

Именно поэтому, не останавливаясь на содержимом (при необходимости см. работу [4]), струк-

турно-логический подход следует классифицировать как симбиоз:

- комплексного подхода благодаря применению агентного принципа моделирования процессов;
- логико-алгебраического подхода благодаря использованию сетевой структуры на основе модифицированной сети Петри в качестве агента;
- логического подхода благодаря реализации в том числе графического аппарата представления траектории развития процесса.

Заключение

Задача высокоэффективного автоматического и в определенной степени автоматизированного управления технологическими процессами в предметной области функционирования РКТ, обработки и анализа измерительной информации является чрезвычайно важной. В основе управления без участия оператора находится управляющий алгоритм как последовательность управляющих воздействий на объект управления. Описание алгоритма заключается в формировании условий применения воздействий с помощью специального инструмента. Данный инструмент использует модель технологического процесса или объекта управления. Таким образом, эффективность управления зависит от качества модели технологического процесса. В данном случае под качеством модели понимается степень учета моделью всех особенностей моделируемого технологического процесса в предметной области.

В целях обоснованной классификации применимых подходов к моделированию технологический процесс испытаний и эксплуатации РКТ, обработки и анализа измерительной информации определен как нестационарный конечномерный

конечный нелинейный процесс с дискретным временем.

Широкий обзор известных подходов из теории моделирования позволил разделить подходы к моделированию технологических процессов на четыре группы: функциональную, алгебраическую, темпоральную и структурную. В данной статье рассмотрены основные представители групп.

Изложенный материал предназначен для классификации предложенного авторами структурно-логического подхода среди известных методов моделирования технологических процессов в рассматриваемой предметной области. На основании приведенной классификации подходов определена принадлежность разработанного

структурно-логического подхода как симбиоза комплексного, логико-алгебраического и логического подходов.

Результаты могут быть использованы для:

— проведения квалиметрии разрабатываемого читателями подхода к моделированию технологических процессов;

— определения среди известных подходов наиболее пригодного для конкретного практического применения;

— определения актуальности и перспективности теоретических и практических исследований в области разработки и совершенствования специального программного обеспечения мониторинга технологических процессов.

Литература

1. Калентьев А. А., Тюгашев А. А. ИПИ/CALS технологии в жизненном цикле комплексных программ управления. — Самара: Изд-во Самарского научно-го центра РАН, 2006. — 285 с.
2. Майданович О. В. и др. Теория и практика построения автоматизированных систем мониторинга технического состояния космических средств / О. В. Майданович, В. А. Каргин, В. В. Мышко, М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов; под ред. О. В. Майдановича: монография. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2011. — 219 с.
3. Черноусько Ф. Л. Динамическое программирование // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 2. С. 139–144.
4. Шмелев В. В. Модели технологических процессов функционирования космических средств // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 4. С. 78–93.
5. Kalman R. E., Falb P. L., Arbib M. A. Topics in Mathematical System Theory. — N. Y.: McGraw-Hill, 1969. — 358 p.
6. Мальцев В. Б. Анализ состояния технических систем. — М.: МО РФ, 1993. — 181 с.
7. Мануйлов Ю. С., Павлов А. Н., Новиков Е. А. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами / под общ. ред. Ю. С. Мануйлова. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. — 266 с.
8. Охтилев М. Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа: монография. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 1999. — 162 с.
9. Рышков Ю. П., Охтилев М. Ю., Богомолов С. Е. Актуальные вопросы автоматизированной обработки и анализа информационных процессов. — М.: МО РФ, 1992. — 140 с.
10. Юдицкий С. А. Моделирование динамики многоагентных триадных сетей. — М.: СИНТЕГ, 2012. — 112 с.
11. Плотников А. М., Рыжиков Ю. И., Соколов Б. В. Современное состояние и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации // Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2011, Санкт-Петербург, 19–21 октября 2011 г.: в 2 т. — СПб.: ФГУП «ЦНИИТС», 2011. Т. 1. С. 51–61.
12. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 149–156.
13. Парийская Е. Ю. Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 1997. № 1. <http://www.math.spbu.ru/diffjournal/RU/numbers/1997.1/article.1.4.html> (дата обращения: 20.07.2016).
14. Павловский Ю. Н. Декомпозиция моделей управляемых систем. — М.: Знание, 1985. — 32 с.
15. Дмитриев А. К., Кравченко И. Д. Модель процесса диагностирования технического объекта при использовании непрерывных диагностических признаков // Изв. вузов. Приборостроение. 1994. Т. 37. № 11–12. С. 3–9.

UDC 681.518.3

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.35

Comparative Analysis of Structural and Logical Approach to Rocket and Space Technology Modeling

Shmelev V. V.^a, PhD., Tech., Doctoral Candidate, valja1978@yandex.ru

Okhtilev M. Yu.^b, Dr. Sc., Tech., Professor, oxt@mail.ru

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The quality of technology control algorithms in rocket and space technology, as well as processing and analysis of measurement data, is determined not only by the results of testing the algorithms but also by the way they are specified. A simple model of the technological process which is at the same time fully adequate to the domain is a tool to describe the control algorithm, greatly increasing its quality. One of the promising directions in the modeling of processes is using the structural and logical approach. **Purpose:** The goal is to classify the known approaches to technological process modeling, taking into account the specific features of the domain, and to identify their strengths and weaknesses using practical implementation examples. **Results:** From the perspective of the classical definition of a dynamic system, a technological process in a domain is generally a time-dependent nonlinear finite process with discrete time. On this base, the known approaches to process modeling are classified into four groups: functional, algebraic, temporal and structural. These approaches are interpreted with references to illustrative examples of their application in Russian space industry, indicating their advantages and disadvantages. It is recommended to choose or create a technological process model step by step. The structural and logical approach is defined as a combination of the complex, logical-algebraic and logical approaches. **Practical relevance:** The obtained results can be used to improve the quality of the technological process modeling approach developed by the readers, in order to substantiate the choice among the known approaches to the modeling, and to check the relevance and prospects of theoretical and practical research on the development of special software in this field.

Keywords — Rocket and Space Technology, Modeling of Technological Processes, Qualimetry of Models, Structural and Logical Approach.

References

1. Kalent'ev A. A., Tiugashev A. A. *IPI/CALS tekhnologii v zhiznennom tsikle kompleksnykh program upravleniia* [CALS Technologies in the Life Cycle Management of Complex Programs]. Samara, Samarskii nauchnyi tsentr RAN Publ., 2006. 285 p. (In Russian).
2. Maidanovich O. V., Kargin V. A., Myshko V. V., Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V. *Teoriia i praktika postroeniia avtomatizirovannykh sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoiianiia kosmicheskikh sredstv* [The Theory and Practice of Construction of Automated Systems for Monitoring the Technical Condition of Space Vehicles]. Saint-Petersburg, 2011. 219 p. (In Russian).
3. Chernous'ko F. L. Dynamic Programming. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*, 1998, no. 2, pp. 139–144 (In Russian).
4. Shmelev V. V. Models of Processes of Functioning of Space Assets. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2015, no. 4, pp. 78–93 (In Russian).
5. Kalman R. E., Falb P. L., Arbib M. A. *Topics in Mathematical System Theory*. New York, McGraw-Hill, 1969. 358 p.
6. Mal'tsev V. B. *Analiz sostoiianiia tekhnicheskikh sistem* [Analysis of the Technical Systems]. Moscow, Ministerstvo oborony Rossiiskoi Federatsii Publ., 1993. 181 p. (In Russian).
7. Manuilov Iu. S., Pavlov A. N., Novikov E. A. *Sistemnyi analiz i organizatsiia avtomatizirovannog upravleniia kosmicheskimi apparatami* [Systems Analysis and Organization of Automated Spacecraft Control]. Saint-Petersburg, VKA im. A. F. Mozhaiskogo Publ, 2010. 266 p. (In Russian).
8. Okhtilev M. Yu. *Osnovy teorii avtomatizirovannogo analiza izmeritel'noi informatsii v real'nom vremeni. Sintez sistemy analiza* [Basic Theory of the Automated Analysis of the Measuring Data in Real Time. Synthesis Analysis]. Saint-Petersburg, VKA im. A.F. Mozhaiskogo Publ., 1999. 162 p. (In Russian).
9. Ryshkov Iu. P., Okhtilev M. Iu., Bogomolov S. E. *Aktual'nye voprosy avtomatizirovannoi obrabotki i analiza informatsionnykh protsessov* [Topical Issues of the Automated Processing and Analysis of Information Processes]. Moscow, Ministerstvo oborony Rossiiskoi Federatsii Publ., 1992. 140 p. (In Russian).
10. Iuditskii S. A. *Modelirovanie dinamiki mnogoagentnykh triadnykh setei* [Modeling the Dynamics of Multi-Agent Network Triad]. Moscow, SINTEG Publ., 2012. 112 p. (In Russian).
11. Plotnikov A. M., Ryzhikov Iu. I., Sokolov B. V. Current Status and Development Trend of the Simulation in the Russian Federation. *Trudy 5-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po imitatsionnomu modelirovaniu i ego primeneniiu v nauke i promyshlennosti "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i praktika" IMMOD-2011* [Proc. of the 5th All-Russian Scientific-Practical Conference on Imitation-Onnomu Modeling and its Application in Science and Industry "Simulation. Theory and Practice"]. Saint-Petersburg, 2011, vol. 1, pp. 51–61 (In Russian).
12. Kalinin V. N., Sokolov B. V. The Multi-Model Approach to Describing Space Means Control Processes. *Teoriia i sistema upravleniia*, 1995, no. 1, pp. 149–156 (In Russian).
13. Pariiskaia E. Iu. Comparative Analysis of Mathematical Models and Approaches to Modeling and Analysis of Discrete-Continuous Systems. *Differentsial'nye uravneniia i protsessy upravleniia*, 1997, no. 1. Available at: <http://www.math.spbu.ru/diffjournal/RU/numbers/1997.1/article.1.4.html>. (accessed 10 July 2016). (In Russian).
14. Pavlovskii Iu. N. *Dekompozitsiia modelei upravliaemykh sistem* [Decomposition Models of Control Systems]. Moscow, Znanie Publ., 1985. 32 p. (In Russian).
15. Dmitriev A. K., Kravchenko I. D. The Technical Object Process Model Diagnosis Using Continuous Diagnostic Features. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 1994, vol. 37, no. 11–12, pp. 3–9 (In Russian).