

СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ 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: технологический процесс в предметной области мониторинга функционирования ракетно-космической техники и обработки и анализа измерительной информации в общем случае является нестационарным конечномерным нелинейным процессом с дискретным временем. В настоящее время известно множество способов представления модели такого технологического процесса. Технологический процесс управляется по алгоритму, в данной предметной области — управляющему алгоритму. Модель процесса — инструмент описания алгоритма. Полностью адекватная предметной области модель в значительной степени уменьшает время создания управляющего алгоритма. **Цель:** разработать показатели сравнения представителей известных подходов к моделированию технологических процессов в предметной области, выявить достоинства и недостатки на примере практических внедрений подходов, определить наиболее пригодный подход. **Результаты:** всего приведено 17 показателей в пяти группах. Первая группа позволяет оценить подход на применимость для передачи многоаспектной сложности технологических процессов, вторая — на способность учитывать ограничения на траекторию развития процесса, третья — на пригодность для программно-алгоритмической реализации, четвертая — на степень удобства с позиции оператора при автоматизированном синтезе модели технологического процесса и пятая — на промышленную применимость. Критерии апробированы на представителях подходов, получивших глубокое практическое применение в области контроля и управления технологическими процессами функционирования ракет-носителей и космических аппаратов. Среди рассматриваемых подходов в качестве наиболее пригодного определен структурно-логический подход, основанный на симбиозе комплексного, логико-алгебраического и логического подходов. **Практическая значимость:** полученные результаты целесообразно применять для обеспечения прикладного характера квалиметрии используемой модели технологических процессов в предметной области, для обоснования направлений информационного поиска практических примеров внедрения специального программного обеспечения мониторинга технологических процессов в предметной области.

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

Введение

В предметной области мониторинга технологических процессов функционирования ракетно-космической техники (РКТ) и обработки измерительной информации автоматическое (автоматизированное) управление заключается в выполнении управляющего алгоритма [1]. Управляющий алгоритм — это строгая последовательно-параллельная совокупность действий по переводу технического процесса из начального в конечное состояние с требуемым показателем качества.

В основе управляющего алгоритма лежит модель управляемого технологического процесса, которая является инструментом описания алгоритма. 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 работе [2] приведены определение технологического процесса и классификация известных подходов к моделированию процессов в предметной области.

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

Известные модели целесообразно разделить на четыре группы подходов.

Первая группа, начинающаяся с вершины математических подходов, может быть названа функциональной. В основе подходов данной группы находится преимущественное применение математических формализмов — функциональных зависимостей, определяющих текущее состояние моделируемого процесса как функции от аргументов.

Алгебраическая группа основана на описании взаимодействующих процессов. Здесь процессы строятся на базисе атомарных операций с помощью набора алгебраических операций. Алгебра процессов — это любая математическая структура, удовлетворяющая системе аксиом, описывающих требуемые свойства основных операторов.

Третья группа — это подходы, основанные на временной (темпоральной, событийной, пошаго-

вой) логике. При этом в качестве модели процесса используется конечная система переходов.

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

Материал статьи [2] позволяет сделать вывод о значительном количестве доступных к использованию в предметной области подходов. Поэтому задача квалиметрии моделей является чрезвычайно актуальной.

В настоящей статье сформулированы показатели качества моделей и проведено сравнение известных подходов к моделированию технологических процессов. Каждый подход сопровождается ссылками на конкретные примеры прикладной реализации. Дополнительно к известным в сравнении участвует разработанный авторами структурно-логический подход к моделированию технологических процессов в предметной области испытаний и эксплуатации РКТ, обработки и анализа измерительной информации, подробно изложенный в работах [3–5].

Общая классификация критериев сравнения подходов к моделированию технологических процессов

После рассмотрения основных подходов к моделированию технологических процессов в предметной области [2] необходимо ввести критерии сравнения подходов. Целью сравнения будет являться получение, конечно, в некоторой степени субъективной и качественной, оценки типовых представителей подходов. При этом целенаправленно идет речь только о представителях подходов, а не о самих подходах. Причиной этого является существенная разница в эффективности подхода в зависимости от его конкретной реализации и области практического приложения.

На основании работ [6–8] 17 критериев сравнения сведены в пять групп, графически квалиметрия подходов к моделированию технологических процессов в предметной области представлена на рисунке.

Рассмотрим каждую группу критериев отдельно по составляющим.

Применимость модели для передачи сложности процесса

Первая группа критериев позволяет сделать вывод о применимости модели для передачи многоаспектной сложности [9] технологических процессов в предметной области. Критериями в данной группе являются:

1. Возможность реализации иерархичности технологического процесса. Данный показатель заключается в возможности составления

модели процесса, структурно состоящего из подпроцессов неограниченной вложенности. Необходимость реализации такой возможности обуславливается агрегированием многоэтапного процесса, например, обработки и анализа измерительной информации по результатам полета ракеты-носителя. Указанный процесс в типовом варианте состоит из более чем 2000 операций, и для уменьшения ресурсоемкости моделирования требуется создание многоуровневой системы моделирования.

2. Возможность реализации модели событийного и совмещенного (с временным) технологического процесса. Необходимость возможности моделирования событийного технологического процесса обосновывается следующим фактором. Некоторые технологические процессы функционирования агрегатов и систем ракеты-носителя предусматривают двойственные единицы измерения: временные и специальные физические, причем временная шкала не всегда имеет преимущественное значение. В качестве примера можно привести процесс расхода топлива, который контролируется не по времени, а по фактам прохождения уровнем топлива характерных отметок в долях полного бака: 20, 40 % и т. д.

3. Возможность моделирования параллельных технологических операций, составляющих процесс. Возможность моделирования развивающихся одновременно технологических процессов является необходимой без сомнения. Реализация «виртуальной параллельности» процессов, когда осуществляется быстрое переключение между элементами, является недопустимой. Ведь РКТ представляет собой совокупность большого числа одновременно изменяющихся состояние систем.

4. Возможность реализации вычислительных процедур с результатами телеизмерений. Отличительной чертой технологических процессов функционирования РКТ является неопределенность фазовой траектории процесса до момента начала его выполнения. При этом траектория зависит не только от моментов времени начала или окончания каких-либо операций, но и от результатов мониторинга состояния систем техники. Это накладывает на модель процесса необходимость возможности реализации вычислительных процедур с результатами телеизмерений, для этого желательно использовать единый инструментарий. Например, сетевые графики такой возможностью не обладают, в отличие от логико-динамических моделей. Примером технологического процесса, развитие которого зависит от результатов обработки и анализа телеизмерений, можно назвать процесс выработки решения на аварийное выключение двигателей ракеты-носителя: для принятия решения необходимо изме-



■ Критерии сравнения основных подходов к моделированию технологических процессов

ритель, обработать и проанализировать в том числе отклонения истинных параметров движения от расчетных.

Способность модели учитывать ограничения на процесс

Вторая группа критериев позволяет сделать вывод о способности модели учитывать ограничения различного рода на траекторию развития процесса.

5. Возможность реализации технологических ограничений на траекторию процесса. Данный критерий позволяет выполнять моделирование процессов, развитие которых определяется специальной технологией с системой ограничений, включающей четыре вида отношений [10, 11]: отношение совместности, отношение несовместности, отношение следования и отношение без-

различия, дополняющее систему отношений до полной.

6. Возможность реализации ресурсных, временных и краевых ограничений на траекторию процесса [10, 11]. Необходимость реализации данного вида ограничений вызывается использованием не только временного алгоритма операций в предметной области. Наглядным примером можно назвать процесс терминального управления полетом ракеты-носителя. Данный процесс определяется не временем полета, а обеспечением в заданной точке траектории полета (точке отделения полезной нагрузки) необходимых кинематических параметров движения разгонного блока.

Последний критерий в совокупности с критериями реализации технологических ограничений и реализации вычислительных процедур позволяет в полной мере охватить перечень воз-

возможных условий ветвления траектории развития технологических процессов в предметной области. В том числе и вариант ручного управления процессом, который реализуется введением дополнительной переменной, значение которой меняет оператор.

Пригодность модели для программно-алгоритмической реализации

Третья группа критериев позволяет оценить степень пригодности метода моделирования для программно-алгоритмической реализации. Не вызывает сомнений, что целесообразность практического применения метода обеспечивается в том числе и трудоёмкостью его приложения к конкретной практической задаче. В соответствии с работами [7, 8], степень пригодности метода моделирования для программно-алгоритмической реализации можно оценить как минимум качественно возможностью решения задач спецификации, синтеза, верификации и определения характеристик технологического процесса, модель которого представлена по анализируемому подходу. Первоначально указанные задачи применялись к специальному программному обеспечению мониторинга технологических процессов в предметной области. Однако необходимо проецировать решаемость этих задач как критериев качества и на метод моделирования, так как в основе программного обеспечения лежит алгоритм (в рассматриваемом приложении управляющий), а алгоритм в свою очередь, как уже говорилось ранее, реализуется с использованием возможностей применяемой модели.

7. Реализуемость спецификации модели технологического процесса. Задача спецификации модели — это задача точного и однозначного задания того, как должен развиваться процесс во времени или в событийных отсчетах. Важнейшими свойствами спецификации должны являться непротиворечивость, адекватность требованиям и задачам, решаемым технологическим процессом, и реализуемость модели имеющимися аппаратными и системными программными средствами в специальном программном обеспечении.

8. Реализуемость синтеза модели технологического процесса. Задача является наиболее важной в практическом плане и представляет собой проблему построения или автоматической генерации модели процесса по его спецификации.

9. Реализуемость верификации модели. Задача верификации модели — это задача проверки соответствия разработанной модели ее спецификации, т. е. проверки того, действительно ли технологический процесс решает те задачи, которые на него возлагаются. Традиционным путем решения задачи верификации является тестирование. Однако тестирование не гарантирует

действительного 100%-го соответствия модели ее спецификации (за исключением искусственно сконструированных простейших случаев). В связи с этим привлекательным направлением исследований остается поиск путей формальной верификации.

10. Реализуемость определения характеристик модели. Задача определения характеристик модели процесса (правильнее говорить о характеристиках непосредственно процесса) заключается в обеспечении для модели классического свойства наблюдаемости. Данное свойство модели следует сформулировать как обеспечение с помощью модели возможности измерять характеристики процесса (временные, ресурсные). Его наличие является необходимым для проведения мониторинга (контроля и прогнозирования) траекторий развития процесса.

Применимость модели для передачи сложности процесса

Процесс создания модели технологического процесса — это совокупность этапов спецификации, синтеза и верификации модели. По содержанию этапов можно утверждать, что «создание модели процесса» аналогично по смыслу и содержанию понятиям «программирование» или «создание программы». Поэтому к способу моделирования применимы критерии, аналогичные критериям, по которым сравниваются среды программирования. То есть способ моделирования — это тоже среда моделирования или среда программирования. Исходя из сказанного, целесообразно ввести четвертую группу критериев, позволяющих оценить удобство использования подхода к моделированию с позиции оператора при автоматизированном синтезе модели технологического процесса.

11. Возможность реализации концепции переходов, а не состояний. Данный критерий заключается в трудоёмкости моделирования сложных процессов, количество состояний которых столь многочисленно, что превышает вычислительные возможности аппаратных средств. Примером подхода к моделированию, использующего концепцию состояний, является аппарат конечных автоматов. Примером подхода к моделированию с использованием концепции переходов можно назвать сети Петри. В предметной области функционирования РКТ на основании изложенного ранее принципа дискретизации времени можно сделать вывод об особенной актуальности выполнения данного критерия.

12. Возможность реализации описания потоков управлений, структур данных и потоков данных, в противовес описанию конкретных экземпляров данных. Модель должна поддерживать типизацию циркулирующей информации.

Это обеспечивается за счет модификации коренных методов моделирования. Например, описание структур данных поддерживается «раскрашенными» сетями Петри. Описание потоков управлений и данных обеспечивается введением дополнительных типов соединительных дуг в графовых методах темпоральной группы.

Следующие четыре критерия данной группы сформулированы в предположении о том, что подходы к моделированию технологических процессов прошли историческое развитие подобно языкам программирования от первого до четвертого поколений (первое — машинные коды, второе — ассемблер, третье — «языки высокого уровня» и четвертое — современное). А четвертому поколению как раз свойственно выполнение следующих четырех критериев.

13. Возможность реализации проблемно-ориентированного подхода к моделированию. Данный критерий подразумевает обязательное использование понятия агентов при моделировании, на которых могут быть построены специфичные, характерные только для конкретной предметной области агрегаты. Их использование значительно ускорит процесс синтеза модели, особенно оператором без основательной предварительной подготовки.

14. Возможность реализации декларативного подхода к моделированию. Критерий заключается в такой организации синтеза модели технологического процесса, когда нет необходимости описывать процесс на императивном уровне в виде, например, сетевого графика, или конечного автомата, или системы дифференциальных уравнений. Декларативный подход обеспечивает возможность задания оператором только (или почти только) граничных состояний процесса и, при необходимости, ограничений различного рода на формируемую при этом автоматически траекторию развития процесса.

15. Возможность реализации визуального (графического) подхода к синтезу модели процесса. Критерий заключается в том, что синтез модели как текста заменяется в определенном масштабе ее изображением в виде графической диаграммы («рисованием»). При этом, опять же, необходимо ввести понятия агента и агрегата. Тогда опера-

ция, как составляющая процесса, может быть заменена агрегатом, если у агрегата присутствуют элементы управления (входы) и элементы наблюдения (выходы). Логико-лингвистические методы моделирования слабо удовлетворяют данному критерию по причине нахождения в их основе символов, а, например, имитационные методы достаточно успешно визуализируются в специальном программном обеспечении благодаря нахождению в их основе типовых операций, заменяемых неизменными агрегатами.

16. Возможность использования естественно-го языка при синтезе модели процесса. Критерий заключается в обеспечении возможности «общения» оператора с программой моделирования на естественном для оператора языке, когда он говорит (именно говорит или, что эквивалентно, вводит на ЭВМ вербальные инструкции) о том, что и как должен выполнять процесс. Этот критерий является, естественно, невыполнимым в общем случае, однако в некоторой узкой предметной области определенные успехи могут быть получены.

Существование программной среды промышленного уровня

Последний критерий, составляющий в единственном числе пятую группу, показывает промышленную применимость подхода.

17. Существование программной среды промышленного уровня с реализацией функций CASE-средств. Критерий заключается в выводе в широкое публичное применение программной среды мониторинга, использующей данную модель технологических процессов. Это является неопровержимым признаком высокой эффективности используемого подхода.

Таким образом, изложено содержимое 17 бинарных (качественных) критериев сравнения способов моделирования технологических процессов в предметной области.

Непосредственно результаты проверки критериев представлены в таблице. Символ «+» обозначает выполнение критерия, «-» — невыполнение. В столбце 2 приведены ссылки на источники с описанием применяемого способа моделирования того или иного технологического процесса

■ Результаты проверки критериев сравнения

Представители подходов к моделированию процессов в предметной области	Источник описания способа моделирования	Группы критериев, критерии сравнения																	Σ
		I				II				III				IV				V	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Простая знаковая модель																			
Диаграмма Ганта на основе рекурсивной модели	[12]	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	10
																		[13]	

■ Окончание таблицы

Представители подходов к моделированию процессов в предметной области	Источник описания способа моделирования	Группы критериев, критерии сравнения																	Σ		
		I				II				III				IV				V			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Аналитическая модель																					
Уравнения непрерывной системной динамики	[10, 11, 14, 15]	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	[14, 15]	9	
Логико-алгебраическая модель (ЛА)																					
Автоматная модель	[16]	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	6	
Триадная модель	[17]	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	[17, 18]	14
Дескриптивная модель																					
Теоретико-множественная модель процесса	[19]	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	7	
Онтологическая модель процесса	[20]	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	+	8	
Логико-лингвистическая модель																					
Модель на основе формальных систем	[21]	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	11	
Комплексная модель (К)																					
Модель на основе классической сети Петри	[22]	+	+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	11	
Модель на основе ВРС-сетей	[24]	-	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	10	
Модель на основе G-сетей	[25]	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	13	
Симбиоз ЛА, К и логической моделей																					
Структурно-логический подход	[4]	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	15	

(как технического, так и организационно-технического). В столбце 19 при положительном итоге приведена ссылка на источник, содержащий описание среды.

Анализ таблицы позволяет сделать вывод о том, что, по мнению авторов, в наиболее полной мере максимальному количеству критериев отвечает предлагаемый ими структурно-логический подход.

Заключение

Технологический процесс в предметной области мониторинга функционирования РКТ и обработки и анализа измерительной информации в общем случае является нестационарным конечномерным нелинейным процессом с дискретным временем. В настоящий момент известно множество способов представления модели такого технологического процесса. Технологический процесс управляется по алгоритму, в данной предметной области — управляющему алгорит-

му. Модель процесса — инструмент описания алгоритма. Полностью адекватная предметной области модель в значительной степени уменьшает время создания управляющего алгоритма.

Материал статьи непосредственно предназначен для оценивания предложенного авторами структурно-логического подхода среди известных методов моделирования технологических процессов в рассматриваемой предметной области.

Для проведения квалитметрии подходов к моделированию технологических процессов разработана система, состоящая из 17 показателей, распределенных по пяти группам. Группы позволяют оценить подход:

- на применимость модели для передачи многоаспектной сложности технологических процессов;
- на способность модели учитывать ограничения различного рода на траекторию развития процесса;
- на пригодность метода моделирования для программно-алгоритмической реализации;

— на степень удобства использования подхода к моделированию с позиции оператора при автоматизированном синтезе модели технологического процесса;

— на промышленную применимость подхода к моделированию.

Результаты системного анализа рассмотренных показателей позволили выбрать в качестве наиболее пригодного структурно-логический подход.

Материал может быть использован для:

— проведения квалиметрии разрабатываемого подхода к моделированию технологических процессов;

— обоснования направлений информационного поиска практических примеров внедрения специального программного обеспечения мониторинга технологических процессов в предметной области.

Литература

1. **Игошин В. И.** Математическая логика и теория алгоритмов. 2-е изд. — М.: Академия, 2008. — 448 с.
2. **Шмелев В. В., Охтилев М. Ю.** Сравнительный анализ структурно-логического подхода к моделированию технологических процессов функционирования ракетно-космической техники // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5. С. 35–44. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.35
3. **Шмелев В. В., Мануйлов Ю. С.** Применение модифицированных сетей Петри к моделированию процесса послеполетного анализа телеметрической информации // Тр. МАИ. 2015. № 6(84). <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=63140> (дата обращения: 10.07.2016).
4. **Шмелев В. В.** Модели технологических процессов функционирования космических средств // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 4. С. 78–93.
5. **Шмелев В. В.** Решение оптимизационной задачи на сетевой модели технологического процесса // Тр. МАИ. 2016. № 4(88). <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=70696>. (дата обращения: 10.07.2016).
6. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Концептуальные и методические основы квалиметрии моделей и полимодельных комплексов // Тр. СПИИРАН. 2004. Вып. 2. Т. 1. С. 10–35.
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 12 с.
8. ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств. Общие положения. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 31 с.
9. **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.
10. **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.
11. **Мануйлов Ю. С., Птушкин А. И., Стародубов В. А.** Методологические основы применения гибких стратегий управления космическими аппаратами. — М.: МО РФ, 2005. — 102 с.
12. **Лескин А. А., Мальцев П. А., Спиридонов А. М.** Сети Петри в моделировании и управлении: монография. — Л.: Наука, 1989. — 133 с.
13. **Куперштейн В. И.** Microsoft Project 2013 в управлении проектами. — СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 432 с.
14. **Плотников А. М.** и др. Комплексное моделирование сложных объектов: основные особенности и примеры практической реализации / А. М. Плотников, С. А. Потрясаев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов // Имитационное моделирование. Теория и практика: тр. Седьмой Всерос. науч.-практ. конф. ИММОД-2015, Москва, 21–23 октября 2015 г. / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН; под общ. ред. С. Н. Васильева, Р. М. Юсупова. Т. 1: Пленарные доклады. — М.: ИПУ РАН, 2015. С. 58–81.
15. **Павлов А. Н.** Модели и методы планирования реконфигурации сложных объектов с перестраиваемой структурой: дис. ... д-ра техн. наук. — СПб.: ГУАП, 2014. — 381 с.
16. **Мелихов А. Н.** Ориентированные графы и конечные автоматы. — М.: Наука, 1971. — 416 с.
17. **Юдицкий С. А.** Моделирование динамики многоагентных триадных сетей. — М.: СИНТЕГ, 2012. — 112 с.
18. **Юдицкий С. А.** Триадно-сетевые дорожные карты развития систем // Управление большими системами. 2013. Вып. 42. С. 55–74.
19. **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.
20. Системы сбора и обработки измерительной информации. www.nicetu.spb.ru/reshenja-i-producty/cistemy-sbora-i-obrabotki-izmeritelnoi-informacii. (дата обращения: 10.07.2016).
21. **Мальцев В. Б.** Анализ состояния технических систем. — М.: МО РФ, 1993. — 181 с.
22. **Зайцев Д. А., Шмелева Т. Р.** Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools. — Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2009. — 72 с.

23. Colored Petri Nets and CPN Tools. <http://cpntools.org/download>. (дата обращения: 10.07.2016).

24. Рышков Ю. П., Охтилев М. Ю., Богомолов С. Е. Актуальные вопросы автоматизированной обработки и анализа информационных процессов. — М.: МО РФ, 1992. — 140 с.

25. 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.

UDC 681.518.3

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.6.34

System of Rocket and Space Technology Functioning Model Quality Indicators

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. Morskaiia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: A technological process in the domain of monitoring the functioning of rocket and space technology and processing/analysis of the measurement data is generally a time-dependent nonlinear finite process with discrete time. Currently, there are many ways to represent a model of such a process. A process is controlled by an algorithm; in the given domain it is a control algorithm. The process model is a tool for describing the algorithm. A model which is fully adequate to the domain substantially reduces the time necessary to develop the control algorithm. **Purpose:** We develop indicators for the comparison of representatives of the known approaches to technological process modeling in the given domain. We study practical implementations of these approaches, identify their pros and cons, and determine the most suitable one. **Results:** In total, there are 17 indicators in 5 groups. The first group allows you to estimate whether an approach is suitable for transmitting multidimensional complexity of the processes. The second group is about the ability to take into account the constraints on the trajectory of the process development. The third one is about the suitability for software and algorithmic implementation. The fourth one is about the operator's convenience during the automated synthesis of a process model. Finally, the fifth group checks the industrial applicability. The criteria have been tested on the approaches widely used for monitoring and control of operational processes in launch vehicles and spacecrafts. Among the approaches under consideration, the structural and logical approach based on the combination of the complex, logical-algebraic and logical approaches has been determined as the most suitable one. **Practical relevance:** The obtained results can be used to provide an applied nature of the quality control process model used in the domain, and to support the directions of search for practical examples of introducing special software for monitoring technological processes in the domain.

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

References

- Igoshin V. I. *Matematicheskaiia logika i teoriia algoritmov* [Mathematical Logic and Theory of Algorithms]. Moscow, Akademiia Publ., 2008. 448 p. (In Russian).
- Shmelev V. V., Okhtilev M. Y. Comparative Analysis of Structural and Logical Approach to the Modeling of Processes of Functioning of Rocket and Space Technology. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 5, pp. 35–44 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.35
- Shmelev V. V., Manuilov Iu. S. Application of Modified Petri Nets to Modeling Processes Post-Flight Analysis of Telemetry Data. *Trudy MAI* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute], 2015, no. 6(84). Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=63140> (accessed 10 July 2016) (In Russian).
- Shmelev V. V. Models of Processes of Functioning of Space Assets. *Aviakosmicheskoe priboroostroenie* [Aerospace Instrumentation], 2015, no. 4, pp. 78–93 (In Russian).
- Shmelev V. V. The Solution of the Optimization Problem on the Network Model of the Process. *Trudy MAI* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute], 2016, no. 4(88). Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=70696>. (accessed 10 July 2016) (In Russian).
- Sokolov B. V., Yusupov R. M. The Conceptual and Methodological Basis of Quality Control Models and Multiple-Complexes. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2004, iss. 2, vol. 1, pp. 10–35 (In Russian).
- State Standard ISO 9126-93. Information Technology. Evaluation of Software Products. Characteristics and Quality of their Application Management. Moscow, Standartinform Publ., 2004. 12 p. (In Russian).
- State Standard 28195-89. Evaluation of Software Quality. General Provisions. Moscow, Standartinform Publ., 2001. 31 p. (In Russian).
- Maidanovich O. V., Kargin V. A., Myshko V. V., Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V. *Teoriia i praktika postroeniia avtomati zirovannykh 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, A. F. Mozhaiskii Military Space Academy Publ., 2011. 219 p. (In Russian).
- Manuilov Iu. S., Pavlov A. N., Novikov E. A. *Sistemnyi analiz i organizatsiia avtomatizirovannogo upravleniia kosmicheskimi apparatami* [Systems Analysis and Organization of Automated Spacecraft Control]. Saint-Petersburg, A. F. Mozhaiskii Military Space Academy Publ., 2010. 266 p. (In Russian).
- Manuilov Iu. S., Ptushkin A. I., Starodubov V. A. *Metodologicheskie osnovy primeneniia gibkikh strategii upravleniia kosmicheskimi apparatami* [Methodological Basis for the Use of Flexible Spacecraft Control Strategies]. Ministerstvo oborony Rossiiskoi Federatsii Publ., 2005. 102 p. (In Russian).
- Leskin A. A., Mal'tsev P. A., Spiridonov A. M. *Seti Petri v modelirovanii i upravlenii* [The Petri Nets in Modeling and Management]. Leningrad, Nauka Publ., 1989. 133 p. (In Russian).
- Kupershtein V. I. *Microsoft Project 2013 v upravlenii proektami* [Microsoft Project 2013 Project Management]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2014. 432 p. (In Russian).
- Plotnikov A. M., Potriasaev S. A., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Complex Modeling of Complex Objects: Main Features and Examples of Practical Implementation. *Sed'maia Vserossiiskaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i praktika" (IMMOD-2015), tom 1* [Proc. of Seventh All-Russia Scientific-Practical Conference "Simulation. Theory and Practice", vol. 1]. Moscow, 2015, pp. 58–81 (In Russian).
- Pavlov A. N. *Modeli i metody planirovaniia rekonfiguratsii slozhnykh ob'ektov s perestraivaemoi strukturoi*. Dis. doct. tech. nauk [Models and Methods of Planning Reconfiguration

- of Complex Objects with Reconfigurable Structure. Dr. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2014. 381 p. (In Russian).
16. Melikhov A. N. *Orientirovannye grafy i konechnye avtomaty* [Directed Graphs and Finite State Machines]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 416 p. (In Russian).
 17. Iuditskii S. A. *Modelirovanie dinamiki mnogoagentnykh triadnykh setei* [Modeling the Dynamics of Multi-Agent Network Triad]. Moscow, SINTEG Publ., 2012. 112 p. (In Russian).
 18. Iuditskii S. A. Triad-Network Systems Development Roadmaps. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Managing Large Systems], 2013, vol. 42, pp. 55–74 (In Russian).
 19. 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).
 20. *Cistemy sbora i obrabotki izmeritel'noj informacii* [Systems for Collecting and Processing the Measurement Information]. Available at: www.nicetu.spb.ru/reshenja-i-producty/cistemy-sbora-i-obrabotki-izmeritelnoi-informacii (accessed 10 July 2016) (In Russian).
 21. Mal'tsev V. B. *Analiz sostoiianiia tekhnicheskikh sistem* [Analysis of the Technical Systems]. Moscow, Ministerstvo oborony Rossiiskoi Federatsii Publ., 1993. 181 p. (In Russian).
 22. Zaitsev D. A., Shmeleva T. R. *Modelirovanie telekommunikatsionnykh sistem v CPN Tools* [Modeling of Telecommunication Systems in the CPN Tools]. Odessa, ONAS im. A. S. Popova Publ., 2009. 72 p. (In Russian).
 23. *Colored Petri Nets and CPN Tools*. Available at: <http://cpn-tools.org/> (accessed 10 July 2016).
 24. Ryshkov Iu. P., Okhtilev M. Yu., 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).
 25. 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, A. F. Mozhaiskii Military Space Academy Publ., 1999. 162 p. (In Russian).
-

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.
