

Метод мониторинга технологических процессов на основе структурно-логического подхода

Шмелев В. В.

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Россия
valja1978@yandex.ru

Аннотация. Статья содержит описание оригинального структурно-логического подхода к моделированию технологических процессов. В качестве исходного описания процесса используется его спецификация, к которой приводятся общепринятые способы описания процессов. Подход включает этапы синтеза модели, проверки ее адекватности прототипу, верификации модели и непосредственно мониторинга технологического процесса с применением синтезированной модели. Подход отличается моделирующей мощностью, в полной мере соответствующей предметной области обработки и анализа измерительной информации ракетной техники. Приводятся краткие сведения о практической апробации подхода, показывающие его преимущество перед применяемым в настоящее время на практике подходом, основанном на рекурсивной модели.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, мониторинг технологического процесса, структурно-логический подход, рекурсивная модель процесса, моделирование процессов, сеть Петри, мультиагентный подход к моделированию.

ВВЕДЕНИЕ

Усложнение не только технической структуры современного ракетно-космической техники (РКТ), но и ее функционирования – неотъемлемая часть развития космической отрасли. Естественно, при этом возрастает важность контроля качества и правильности технологических процессов, а понятие контроля расширяется до мониторинга [1]. При этом объектом мониторинга является модель технологического процесса.

Использование модели процесса, учитывающей особенности предметной области функционирования РКТ, позволяет значительно повысить качество мониторинга технологических процессов в предметной области позволил сделать вывод об их несоответствии современным требованиям специалистов по обработке и анализу телеметрической информации РКТ [2].

Перспективным направлением исследований по совершенствованию мониторинга технологических процессов в предметной области является оригинальный структурно-логический подход (СЛП) [3]. Актуальна компактная систематизация структуры СЛП. В целях обеспечения практической направленности подход будет проецироваться на технологический процесс предстартовой подготовки, пуска и полета ракеты-носителя (РН) «Союз-2».

ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Содержательно мониторинг процессов заключается в непрерывном (в реальном времени) слежении за состоянием характеристик контролируемого процесса и в оповещении пользователя (оператора) в удобном для него виде о происходящих событиях (как штатных, так и нештатных) с объяснением автоматически принятых решений по оцениванию состояний, с формированием рекомендаций по управлению, с прогнозированием дальнейшего развития событий [4, 5].

Основные задачи при мониторинге технологического процесса: спецификации, синтеза, адекватности, верификации и непосредственно мониторинга.

Задача спецификации – точно и однозначно задать начальное, конечное состояния модели процесса, а также требуемые значения показателей/свойств процесса. Задача спецификации решается на этапе разработки технического задания на создание РКТ. Документом, определяющим спецификацию работы систем РН «Союз-2», является соответствующая циклограмма [6]. Важнейшими свойствами спецификации должны быть непротиворечивость, адекватность требованиям и задачам, решаемым объектом РКТ в целом, а также реализуемость имеющимися аппаратными и системными программными наземными и бортовыми средствами.

Задача синтеза представляет собой построение или автоматическую генерацию модели процесса по ее спецификации. Данная задача наиболее сложна и трудоемка, она изменяет устоявшийся способ представления информации о технологическом процессе. Так создается новая модель процесса работы систем РН «Союз-2», в данном случае – с применением СЛП.

Задача адекватности – проверить соответствие модели процесса ее спецификации, т. е. действительно ли процесс решает те задачи, которые на него возлагаются.

Задача верификации – найти и устранить возможные ошибки в процессе по синтезированной модели, обусловленные некорректностью (ограниченностью) спецификации. Это происходит путем доказательства важных свойств процесса, представляемого моделью, в том числе свойств, приписываемых классическим сетям Петри: непротиворечивости, корректности, активности, консервативности, живости и др. [7].

Задача мониторинга – это основная, комплексная задача, включающая операции непрерывного наблюдения (измерения) параметров процесса, вычисления значений его характеристик, сравнения полученных значений с заданными (граничными, эталонными) значениями, прогноза развития процесса, а также формирования (при необходимости) управляющих воздействий.

СПЕЦИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Рассмотрим общую форму спецификации процесса. Технологический процесс \mathfrak{R} описывается кортежем:

$$\mathfrak{R} = \langle S, L \rangle, \quad (1)$$

где $S = \{S_k \mid k = 1, \overline{\text{card}(I_S)}\}$ – множество операций технологического процесса \mathfrak{R} ; S_k – k -я операция, входящая в технологический процесс \mathfrak{R} ; I_S – целочисленное положительное не пустое ограниченное множество номеров операций, тогда $\text{card}(I_S)$ – мощность множества операций или их количество. Смысловым содержанием элемента S_k является идентификатор k -й операции; $L = \{l_k \mid k = 1, \overline{\text{card}(I_S)}\}$ – множество кортежей, обуславливающих выполнение операции S_k технологического процесса \mathfrak{R} .

Вектор l_k является многомерным кортежем:

$$l_k = \langle Id_k, t_k, \tau_k \rangle, \quad (2)$$

где $Id_k = \langle B_b^{(k)}, B_f^{(k)} \rangle$ – вектор-идентификатор операции S_k технологического процесса \mathfrak{R} , состоящий из элементов: $B_b^{(k)}$ – булева переменная, идентифицирующая условие начала выполнения операции (b – *begin*, начало); $B_f^{(k)}$ – булева переменная, идентифицирующая условие окончания выполнения операции (f – *finite*, окончание); t_k – момент начала выполнения операции S_k технологического процесса \mathfrak{R} в единицах изменения состояний процесса (не только временных единицах), данный элемент «планируется» перед началом процесса и корректируется при его выполнении; τ_k – длительность операции S_k технологического процесса \mathfrak{R} в единицах изменения состояний процесса.

Условия начала и окончания операции описываются предикатами:

$\text{Pr}(B_b^{(k)})$ – предикат, при истинности которого допускается начало выполнения операции S_k технологического процесса \mathfrak{R} , в качестве аргументов могут содержаться булевы переменные других операций и произвольные логические операции над ними;

$\text{Pr}(B_f^{(k)})$ – предикат, при истинности которого допускается окончание выполнения операции S_k технологического процесса \mathfrak{R} .

МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЩЕГО ВИДА

Синтез модели технологического процесса заключается в построении модели по его спецификации. Рассмотрим последовательно структуру моделей операции, процесса и порядок генерации модели по спецификации (1) процесса.

Операция представляется кортежем:

$$S = \langle P, T, F, B, H^+, H^-, M \rangle. \quad (3)$$

На рис. 1 представлена схема модели операции, которую целесообразно использовать для придания конструктивности модели операции.

Для проверки работы модели операции на рис. 1 использована среда CPNTools [8–10], позволяющая создавать и исследовать иерархические сложные модифицированные (цветные и расширенные) модели процессов.

Элементы рис. 1 несут смысловую нагрузку позиций, переходов, дуг и фишек инструмента сетей Петри [7]. В кортеже (3) используются элементы:

- $P = \{P_{\text{вн}}, P_{\text{ин}}, P_{\text{оут}}\} = \{p_i \mid i \in I_P\}$ – конечное непустое множество позиций схемы операции S , I_P – множество номеров позиций, $P_{\text{вн}}$, $P_{\text{ин}}$ и $P_{\text{оут}}$ – множества, соответственно, внутренних, входных и выходных позиций. Элементы множества $P_{\text{вн}}$ на рис. 1 обозначаются кругами, $P_{\text{ин}}$ – полукругами с выходящими стрелками, $P_{\text{оут}}$ – полукругами с входящими стрелками;

- $T = \{t_j \mid j \in I_T\}$ – конечное непустое множество переходов схемы операции S , I_T – множество номеров переходов. На рис. 1 элементы множества T обозначены прямоугольниками;

- $F : P \times T \rightarrow N$ – входная функция инцидентности, описывающая кратность входной дуги от позиции p_i к переходу t_j схемы операции S и ставящая в соответствие каждой паре $\langle p_i, t_j \rangle$, $i \in I_P$, $j \in I_T$ элемент множества целых неотрицательных чисел N . На рис. 1 вариант входной функции инцидентности F обозначается линией с одной стрелкой от кругов (полукругов) к прямоугольникам. Линия с обозначением $\langle \dots \rangle$ является кратной;

- $B : P \times T \rightarrow Nb$ – входная функция инцидентности, описывающая сбрасывающую дугу от позиции p_i к переходу t_j схемы операции S и ставящая в соответствие каждой паре $\langle p_i, t_j \rangle$, $i \in I_P$, $j \in I_T$ элемент бинарного множества $Nb = \{0, 1\}$. На рис. 1 вариант входной функции инцидентности B обозначается линией с двумя стрелками на одном конце от кругов (полукругов) к прямоугольникам;

- $H^+ : T \times P \rightarrow N$ – выходная функция инцидентности, описывающая кратность выходной «классической» дуги от перехода t_j в позицию p_i схемы операции S и ставящая в соответствие каждой паре $\langle t_j, p_i \rangle$, $i \in I_P$, $j \in I_T$ элемент множества целых неотрицательных чисел N . На рис. 1 вариант выходной функции инцидентности H^+ обозначается линией с одной стрелкой от прямоугольника к кругу (полукругу). Линия с двунаправленными стрелками – возвращающая;

- $H^- : T \times P \rightarrow N$ – выходная функция инцидентности, описывающая кратность выходной извлекающей («неклассической») дуги от перехода t_j в позицию p_i сети и ставящая в соответствие каждой паре $\langle t_j, p_i \rangle$, $i \in I_P$, $j \in I_T$ элемент множества целых неотрицательных чисел N . На рис. 1 вариант выходной функции инцидентности H^- обозначается линией с одной стрелкой от прямоугольника к кругу (полукругу), противоположный стрелке конец линии содержит малый круг;

- $M : P \rightarrow N$ – функция разметки, которая каждому элементу $p_i \in P$ ставит в соответствие элемент множества целых неотрицательных чисел N . На рис. 1 вариант функции разметки M обозначается точками внутри кругов.

Позиции «Старт», «Стоп», «ПриостВыв» (приостановка выполнения операции) и «ПродВыв» (продолжение выполнения операции) являются позициями, получающими

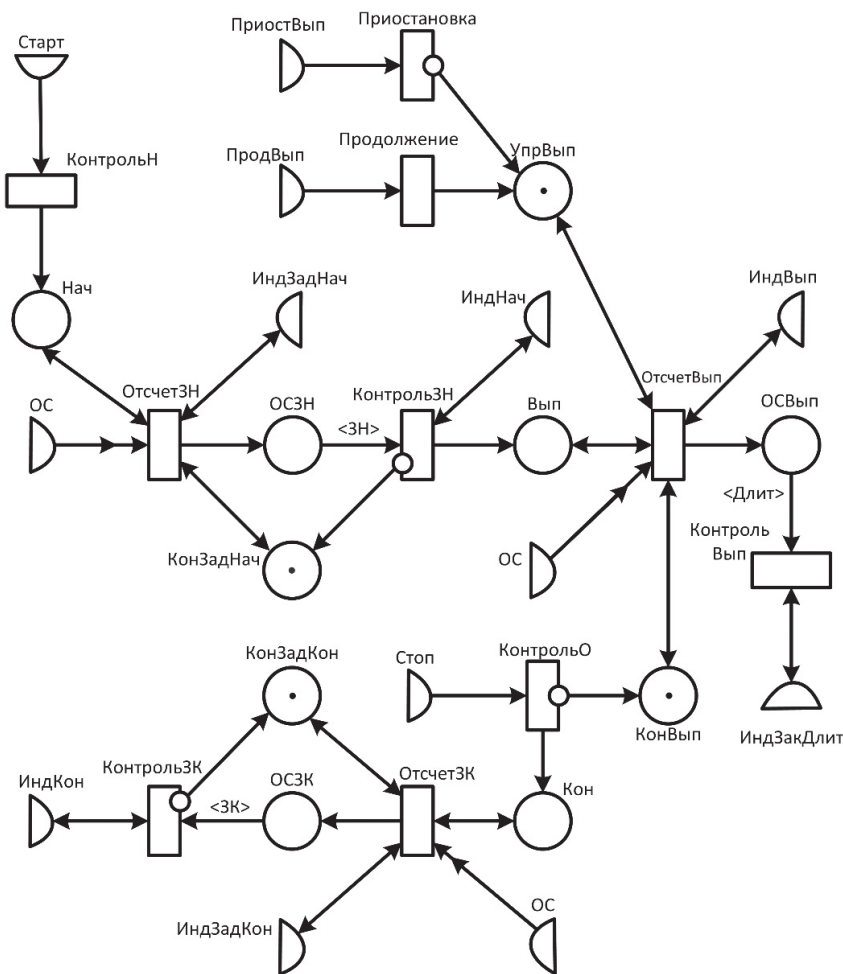


Рис. 1. Схема модели операции

управляющие сигналы от внешних схем. Данные позиции обеспечивают выполнение требования управляемости модели процесса. Управляющие позиции можно считать бинарными, так как они могут быть в двух состояниях: нет ни одной фишки, есть только одна фишка.

Позиция «ОС» (отсчет событий) содержит отсчеты событий, используемые для смены состояния модели операции. В качестве таких событий могут выступать метки времени или факты наступления событий при контроле не временных, а событийных процессов. Позиция «ОС» по содержанию является бинарной, так как последующими переходами обрабатывается только факт прихода отсчета, но не количество ранее совершившихся событий, т. е. количество имеющихся в позиции «ОС» фишек. Этим обеспечивается инвариантность модели к типу единиц изменения состояния операции.

Позиции «ИндЗадНач» (индикация степени отсчета задержки начала операции), «ИндНач» (индикация фактического старта выполнения операции), «ИндВып» (индикация степени выполнения операции), «ИндЗадКон» (индикация степени отсчета задержки окончания операции), «ИндКон» (индикация фактического окончания выполнения операции) и «ИндЗакДлит» (индикация планируемого окончания выполнения операции по длительности) являются индикаторными и обеспечивают наблюдаемость модели операции. Данные позиции должны использоваться внешними схема-

ми для определения траектории развития процесса в целом путем сравнения значений в данных позициях с некоторыми эталонами. Управляющие позиции «ИндЗадНач», «ИндВып» и «ИндЗадКон» являются счетными по содержанию, так как содержат количество отсчетов событий, полученных за соответствующий интервал. Позиции «ИндНач», «ИндКон» и «ИндЗакДлит» являются бинарными, так как смыслоносодержащими являются только состояния наличия и отсутствия фишек.

Внутренние позиции и переходы обеспечивают смену состояния операции, т. е. изменение разметок выходных (индикаторных) позиций в зависимости от разметок входных (управляющих) позиций. Внутренние позиции и переходы: «Нач» (начало), «ОтсчетЗН» (отсчет задержки начала), «ОСЗН» (отсчет событий задержки начала), «КонтрольЗН» (контроль задержки начала), «КонЗадНач» (окончание отсчета задержки начала фактического выполнения ТО), «Вып» (выполняется), «ОтсчетВып» (отсчет фактического выполнения), «ОСВып» (отсчет событий выполнения), «КонтрольВып» (контроль выполнения), «УпрВып» (управление выполнением операции), «Приостановка» (приостановка выполнения операции), «Продолжение» (продолжение выполнения операции), «КонВып» (контроль выполнения операции), «КонтрольО» (контроль окончания), «Кон» (окончание), «ОтсчетЗК» (отсчет задержки окончания), «ОСЗК» (отсчет событий задержки окончания), «КонтрольЗК» (контроль

задержки окончания), «КонЗадКон» (окончание отсчета задержки фактического окончания выполнения ТО).

Для обеспечения компактности изложения формальная модель операции не приводится. Она достаточно легко формируется по схеме рис. 1 и составу кортежа (4).

Представленная на рис. 1 схема модели операции является максимально общей по возможности наблюдения и управления состоянием процесса. Поскольку схема на рис. 1 универсальна, совокупность элементов схемы операции за исключением входных и выходных позиций можно заменить специальным переходом-процедурой (рис. 2). Переход-процедура обозначен прямоугольником с двойными линиями. В левой части приведены входные позиции, формирующие траекторию развития процесса, в правой – выходные (индикаторные) позиции, показывающие ход процесса. Внутри перехода-процедуры приведены значения длительностей задержки начала выполнения (<ЗН>), задержки окончания выполнения (<ЗК>) и непосредственно выполнения операции (<Длит>).

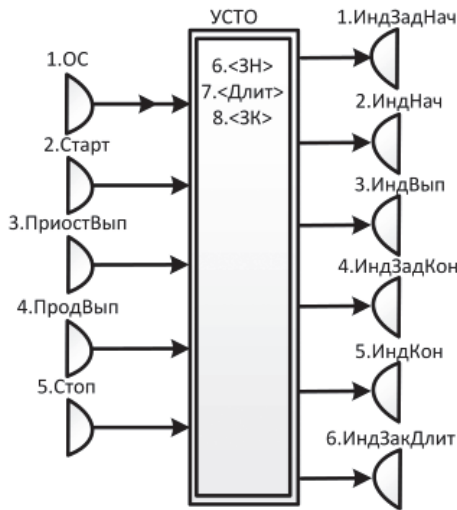


Рис. 2. Переход-процедура – компактная графическая модель операции

Модель процесса представляет собой кортеж:

$$\hat{\mathfrak{R}} = \langle S, \mathfrak{T}, Q \rangle, \quad (4)$$

где S – множество операций процесса, каждая из которых – кортеж (3); $\mathfrak{T} = \left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{T}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N \\ \mathfrak{T}_{out} : P_{out}^{(k)} \times P_{in}^{(m)} \rightarrow N \end{array} \right\}$ – векторная функция инцидентности, описывающая логику технологического процесса $\hat{\mathfrak{R}}$; \mathfrak{T}_{in} – входная функция инцидентности операции S_k , где $\mathfrak{T}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N$ описывает «склеивание» выходных позиций операции S_l и входных позиций операции S_k ; $\mathfrak{T}_{out} : P_{out}^{(k)} \times P_{in}^{(m)} \rightarrow N$ описывает «склеивание» выходных позиций операции S_k и входных позиций операции S_m , $l, k, m \in I_S$. Перечень «склеиваемых» входных позиций из множества $P_{in}^{(k)} = \{\text{«ОС»}, \text{«Старт»}, \text{«Стоп»}, \text{«ПриостВыв»}, \text{«ПродВыв»}\}$ (см. рис. 1, 2) и выходных из множества $P_{out}^{(k)} = \{\text{«ИндЗадНач»}, \text{«ИндНач»}, \text{«ИндВыв»}, \text{«ИндЗадКон»}, \text{«ИндКон»}, \text{«ИндЗакДлит»}\}$ определяет логику развития моделируемого технологического процесса; $Q = \{Q_k | k = 1, \text{card}(I_S)\}$ – множество ограничений технологического процесса $\hat{\mathfrak{R}}$;

Q_k – множество отношений, ограничивающий выбор альтернативы развития k -й операции. Ограничение Q_k операции S_k также является множеством $Q_k = \{q_c^{(k)} | c = 1, \text{card}(Q)\}$, где $q_c^{(k)}$ – c -й вид ограничения операции S_k ; c – порядковый номер ограничения; $\text{card}(Q)$ – количество накладываемых ограничений.

СИНТЕЗ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Синтез модели технологического процесса заключается в установлении функционального соответствия между элементами кортежа $\hat{\mathfrak{R}}$ (4) и кортежа \mathfrak{R} (1). Непосредственно необходимо определить переход от элементов кортежа \mathfrak{R} (1) к входным позициям перехода процедуры «Старт» и «Стоп» (см. рис. 1, 2) для каждой операции процесса, а также функцию, определяющую длительность выполнения операции (<Длит>). Номер операции определяет переменная k .

Разметка позиции «Старт» определяется результатом проверки предиката $\text{Pr}(B_b^{(k)})$:

$$M(\text{Старт}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{Pr}(B_b^{(k)}) = \text{«истина»} \\ 0, & \text{если } \text{Pr}(B_b^{(k)}) = \text{«ложь»} \end{cases}$$

Разметка позиции «Стоп» определяется результатом проверки предиката $\text{Pr}(B_f^{(k)})$:

$$M(\text{Стоп}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{Pr}(B_f^{(k)}) = \text{«истина»} \\ 0, & \text{если } \text{Pr}(B_f^{(k)}) = \text{«ложь»} \end{cases}$$

Длительность операции <Длит> задается равной переменной τ_k :

$$F < \text{ОСВыв}, \text{КонтрольВыв} > = < \text{Длит} > = \tau_k.$$

Входные позиции «ОС», «ПриостВыв» и «ПродВыв» перехода процедуры, переменные <ЗН> и <ЗК> (см. рис. 2) являются уникальными и не требуют определения через элементы кортежа \mathfrak{R} (1).

Рассмотрим порядок определения структуры процесса $\hat{\mathfrak{R}}$, а именно множества \mathfrak{T} .

Логическое условие начала k -й операции описывается с помощью отношения

$$B_{Pr_b} : \text{Pr}(B_f^{(l)}) \times \text{Pr}(B_b^{(k)}) \rightarrow \mathfrak{T}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N; \\ P_{in}^{(k)} = \{\text{ОС}, \text{Старт}, \text{Приостановка}, \text{Продолжение}\}.$$

Отношение B_{Pr_b} определяет взаимосвязь l -й и k -й операций. В рамках СЛП отношение B_{Pr_b} преобразуется в функцию инцидентности \mathfrak{T}_{in} между выходными позициями перехода-процедуры l -й и входными позициями перехода-процедуры k -й операций. Данная функция будет определять условие начала k -й операции. Это обеспечивается наличием во множестве $P_{in}^{(k)}$ позиции «Старт».

Логическое условие окончания k -й операции описывается с помощью отношения

$$B_{Pr_f} : \text{Pr}(B_f^{(m)}) \times \text{Pr}(B_b^{(k)}) \rightarrow \mathfrak{T}_{in} : P_{out}^{(m)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N; \\ P_{in}^{(k)} = \{\text{ОС}, \text{Стоп}, \text{Приостановка}, \text{Продолжение}\}.$$

Отношение $B_{P_{rf}}$ определяет взаимосвязь m -й и k -й операций. В рамках СЛП отношение $B_{P_{rf}}$ также преобразуется в функцию инцидентности \mathfrak{Z}_{in} между выходными позициями перехода-процедуры m -й и входными позициями перехода-процедуры k -й операций. Но только уже данная функция будет определять условие окончания k -й операции. Это обеспечивается наличием во множестве $P_{in}^{(k)}$ позиции «Стоп».

Конкретный перечень используемых позиций $P_{in}, P_{out} \in P$ определяется видом взаимосвязи $B_{P_{rb}}$ и $B_{P_{rf}}$.

Составляющая \mathfrak{Z}_{out} векторной функции инцидентности \mathfrak{Z} предыдущей операции формируется автоматически при формировании составляющей \mathfrak{Z}_{in} векторной функции инцидентности \mathfrak{Z} очередной операции.

Особенностью предметной области является возможность наложения на технологический процесс \mathfrak{R} различного рода ограничений Q . Приведем вербальный и графический способ представления ограничений Q для модели процесса \mathfrak{R} , созданной в соответствии с положениями СЛП.

Для описания ограничений предлагается использовать инструмент G-моделирования, разработанный М. Ю. Охтилевым [11] и нашедший применение в практике автоматизации подготовки и пуска РН «Союз-2» [1]. Однако в нашем случае изменится область применения данного инструмента. Ограничение – это правило классической структуры «Если предикат истинен, то выполняется соответствующее действие».

Рассмотрим графический способ описания ограничений. Основой реализации учета ограничений является предикатный переход. На рис. 3 представлен фрагмент схемы операции только из одной входной позиции.

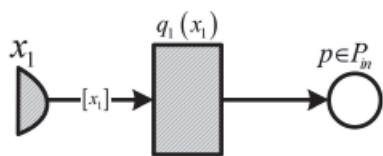


Рис. 3. Графическое представление реализации ограничений технологического процесса

Заштрихованный полукруг представляет собой позицию, включающую значение соответствующего аргумента. Данная позиция содержит не просто фишку в классическом ее понимании в теории сетей Петри, но именно фишку – значение аргумента. С учетом особенностей предметной области в качестве аргументов могут выступать отдельные значение телеметрируемых параметров, совокупности значений, числовые результаты обработки параметров, качественные результаты контроля и диагностирования систем ракетно-космической техники и наземного оборудования. Такая позиция может быть названа z -позицией (z – значение). Относительно разметки z -позиций следует отметить, что $m(z_i) \in \{0, 1\}$, т.е. в z -позиции может присутствовать только одна фишка. Источником информации в z -позициях являются средства измерений, вычислительные алгоритмы, внешние относительно схемы модели технологического процесса.

Дуга, на которую нанесено обозначение аргумента в квадратных скобках $[\cdot]$, соединяет только z -позиции и предикатные переходы. Такие дуги можно назвать z -дугами. Они предназначены для передачи фишек только со значениями соответствующего аргумента.

Предикатный переход обозначается заштрихованным прямоугольником. Над прямоугольником представлен предикат, в скобках – аргумент предиката. Условием срабатывания перехода является не только наличие фишки во входных позициях (как классических, так и в z -позициях), но и истинность указанного предиката. При срабатывании предикатного перехода формируется классическая фишка в позициях в соответствии с выходной функцией инцидентности предикатного перехода. Прототипом предикатного перехода и z -позиции являются соответствующие элементы G-сетей, описанные в [11].

Подробно рассматривать формальный способ описания ограничений нет необходимости. Формальная модель ограничения соответствует по структуре кортежу (3) с соответствующими незначительными изменениями компонентов.

АДЕКВАТНОСТЬ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Формально адекватность модели устанавливается обратным формированием элементов кортежей (1) и (2) по содержанию элементов кортежей (3) и (4). Предлагается рассмотреть порядок вывода элементов Id_k, t_k и τ_k кортежа l_k для k -й операции из элементов кортежа $S = \langle P, T, F, B, H^+, H^-, M \rangle$, составленного для той же операции.

Как отмечалось при описании модели технологической операции, благодаря универсальности структура схем моделей различных операций различается только кратностью дуги:

$$F < \text{ОСВып}, \text{КонтрольВып} > = < \text{Длит} >.$$

Можно записать

$$\tau_k = < \text{Длит} >.$$

Момент t_k начала выполнения операции S_k процесса \mathfrak{R} в единицах изменения состояний процесса в явном виде отсутствует в кортеже (3). Так как это только «планируемый» момент начала выполнения операции, контролировать адекватность модели спецификации по данному элементу кортежа (2) нет необходимости.

Булевы переменные, идентифицирующие условия начала и окончания выполнения операции, соответственно, $B_b^{(k)}$ и $B_f^{(k)}$, формируются путем анализа векторной функции инцидентности \mathfrak{Z} созданной k -й операции. При этом достаточно рассмотреть только входную функцию инцидентности \mathfrak{Z}_{in} , так как составляющая \mathfrak{Z}_{out} предыдущей операции формируется автоматически при формировании составляющей \mathfrak{Z}_{in} очередной операции.

Анализируются аргументы $P_{out}^{(l)}$ и $P_{in}^{(k)}$ входной функции инцидентности \mathfrak{Z}_{in} в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} \mathfrak{Z}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} &\rightarrow \\ \rightarrow N : (N > 0, P_{out}^{(l)} = \text{ИндЗакДлит}^{(l)}, P_{in}^{(k)} = \text{Старт}) &\Rightarrow \\ \Rightarrow \text{Pr}(B_b^{(k)}) = O(l); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow \\ \rightarrow N : (N > 0, P_{out}^{(l)} = \text{ИндЗакДлит}^{(l)}, P_{in}^{(k)} = \text{Стоп}) \Rightarrow \\ \Rightarrow \Pr(B_f^{(k)}) = O(l); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N : (N > 0, P_{out}^{(l)} = \\ = \text{ИндНач}^{(l)}, P_{in}^{(k)} = \text{Старт}) \Rightarrow \\ \Rightarrow \Pr(B_b^{(k)}) = H(l); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow \\ \rightarrow N : (N > 0, P_{out}^{(l)} = \text{ИндНач}^{(l)}, \\ P_{in}^{(k)} = \text{Стоп}) \Rightarrow \Pr(B_f^{(k)}) = H(l); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N : (N = 0, \forall P_{out}^{(l)}, P_{in}^{(k)} = \text{Стоп}) \Rightarrow \\ \Rightarrow \Pr(B_f^{(k)}) = \text{"По длит."}. \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение (5) показывает, что если входная функция инцидентности \mathfrak{I}_{in} устанавливает связь между выходной позицией $\text{ИндЗакДлит}^{(l)}$ (или $\text{ИндЗак}^{(l)}$) l -й операции и входной позицией Старт k -й операции, то условием начала k -й операции в спецификации является начало l -й операции. Выражение (6) показывает, что если входная функция инцидентности \mathfrak{I}_{in} устанавливает связь между выходной позицией $\text{ИндЗакДлит}^{(l)}$ (или $\text{ИндЗак}^{(l)}$) l -й операции и входной позицией Стоп k -й операции, то условием окончания k -й операции в спецификации является окончание l -й операции. Выражение (7) показывает, что если входная функция инцидентности \mathfrak{I}_{in} устанавливает связь между выходной позицией $\text{ИндНач}^{(l)}$ l -й операции и входной позицией Старт k -й операции, то условием начала k -й операции в спецификации является начало l -й операции. Выражение (8) показывает, что если входная функция инцидентности \mathfrak{I}_{in} устанавливает связь между выходной позицией $\text{ИндНач}^{(l)}$ l -й операции и входной позицией Стоп k -й операции, то условием окончания k -й операции в спецификации является достижение длительности k -й операции $\tau_k \leq \text{Длит}$. В последнем случае в спецификацию вносится запись «По длит.».

При равенстве полученных выражений $\Pr(B_b^{(k)})$ и $\Pr(B_f^{(k)})$, $k = \overline{1, \text{card}(I_S)}$ можно утверждать, что адекватность синтезированной модели своей спецификации соблюдена по элементу $L = \{l_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}\}$ кортежа (1).

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Под ошибками в синтезированной модели понимаются критические прерывания (зацикливания) выполнения процесса (модели процесса) в не предусмотренные спецификацией моменты или этапы [12].

В качестве критических свойств, проверка которых обеспечит успешный результат формальной верификации синте-

зированной модели, следует назвать непротиворечивость, корректность и активность синтезированной модели технологического процесса.

Непротиворечивость модели технологического процесса

Значительное расширение моделирующей мощности структурно-логического подхода, особенно в области РКТ, достигается введением предикатных переходов.

В то время как на выполнение классических переходов не накладывается никаких ограничений, предикатные переходы выполняются (с одновременным занесением фишки в свою выходную позицию) лишь тогда, когда значение соответствующей предикатной функции $q_c^{(k)}(\cdot) = \text{"истина"}$, где $q_c^{(k)}(\cdot)$ – c -й вид ограничения операции S_k .

Множество значений аргументов (\cdot) как предметных переменных предикатной функции для соответствующего предикатного перехода, при которых выполняется условие $q_c^{(k)}(\cdot) = \text{"истина"}$, определяет область применимости $D_{q_c^{(k)}(\cdot)}$ перехода $q_c^{(k)}(\cdot)$.

Используя обозначения областей применимости, условие выполнимости модели процесса $\hat{\mathfrak{R}}$ можно записать в виде

$$D_{\hat{\mathfrak{R}}} = \bigcap_{k=1, \text{card}(I_S)} D_{S_k} = \emptyset. \quad (10)$$

Критическая ошибка возможна тогда, когда в модели процесса $\hat{\mathfrak{R}}$ существует, например, такая пара предикатов $q_1^{(c)}(\cdot)$ и $q_2^{(c)}(\cdot)$, которые на одном и том же подмножестве

$$D_{q_{1,2}^{(c)}(\cdot)} = \left(D_{q_1^{(c)}(\cdot)} \cap D_{q_2^{(c)}(\cdot)} \right) \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

принимая значения «истина», и «ложь».

При выявлении факта критической ошибки вследствие невыполнения выражения (10) следует дополнительно проанализировать наложенные ограничения $Q_k, k = \overline{1, \text{card}(I_S)}$. Смысл анализа должен заключаться в выявлении тех ограничений (предикатов) $q_c^{(k)}(\cdot)$, которые не обеспечивают выполнение равенства (10).

Корректность модели технологического процесса

Операция $S_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}$ процесса $\hat{\mathfrak{R}}$ считается корректной, если она одновременно корректна и по входу, и по выходу. Операция S_k является корректной по выходу, если для любой разметки индикаторных позиций $m(p_i) > 0, p_i \in P_{out}$ четко определен дальнейший порядок выбора каждой определяющей эту разметку фишки. Операция S_k является корректной по входу, если четко определено, каким способом была сформирована любая фишка, формирующая разметку $m(p_i) > 0, p_i \in P_{in}$ управляющих позиций P_{in} этой операции.

Приведенные определения понятий корректности операций не являются строгими и описывают рассматриваемое явление лишь на содержательном или интуитивном уровне. Точные определения корректности должны следовать из структуры входной и выходной функций инцидентности.

Операция, не корректная по входу, должна иметь следующий вид функции $\mathfrak{I}_{in}^{(k)}$:

$$\mathfrak{I}_{in}^{(k)} \left(P_{out}^{(c)}, P_{in}^{(k)} \right) = 1,$$

причем $\text{card}(P_{out}^{(c)}) > 1$, $\text{card}(P_{in}^{(k)}) = 1$.

Данное выражение раскрывается следующим образом. Входная функция инцидентности $\mathfrak{Z}_{in}^{(k)}$ операции S_k , некорректной по входу, имеет в качестве первого элемента кортежа множество позиций, по мощности большее 1, а в качестве второго элемента кортежа – только одну управляющую позицию операции S_k .

Операция, некорректная по выходу, должна иметь следующий вид функции $\mathfrak{Z}_{out}^{(k)}$:

$$\mathfrak{Z}_{out}^{(k)} \langle P_{out}^{(k)}, P_{in}^{(c)} \rangle = 1,$$

причем $\text{card}(P_{out}^{(k)}) = 1$, $\text{card}(P_{in}^{(c)}) > 1$.

Проверка корректности для каждой операции формирует корректную модель процесса в целом. Устранение некорректности по входу и выходу осуществляется добавлением фиктивных позиций и переходов, как описано, например, в [8, 11].

Тупиковые позиции в модели процесса (активность модели)

Непредусмотренная ситуация, когда не формируется разметка входных позиций, изменяющая состояние какой-либо операции, является ошибкой или тупиком в синтезированной модели. Для рассуждений будем рассматривать фрагмент схемы модели процесса, состоящий из двух операций, представленных на рис. 4.

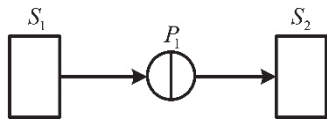


Рис. 4. Фрагмент схемы модели процесса

На рис. 4 позиция P_1 есть объединяющее множество $P_1 = \{P_{out}^{(1)}, P_{in}^{(2)}\}$.

Операция S_2 схемы модели процесса является тупиковой, если при выполнении фрагмента модели возможен случай, когда пришедшая в позицию P_1 фишка никогда не может быть выбрана оттуда.

Условие прихода (появления) фишки в позиции P_1 схемы модели процесса задается в виде $\mathfrak{Z}_{out}^{(1)} : P_{out}^{(1)} \times P_{in}^{(2)} \rightarrow N$, где $N > 0$, а условие выхода (использования) фишки в этой позиции $\mathfrak{Z}_{in}^{(2)} : P_{out}^{(1)} \times P_{in}^{(2)} \rightarrow N$, где $N > 0$.

Можно отметить, что операция S_2 тогда и только тогда не будет тупиковой, когда $N > 0$. Выполнение данного выражения является условием отсутствия тупиков для соответствующей операции.

Итак, после проверки всех трех условий формируется непротиворечивая, корректная, активная модель технологического процесса, что в совокупности позволяет говорить об успешной верификации синтезированной модели технологического процесса.

МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Приложение синтезированной модели как предмета мониторинга технологического процесса поясняет рис. 5.

Штриховыми линиями на рис. 5 обозначены операции, выполнение которых может быть опущено. Представлен

ная на рис. 5 информация известна и является максимально общей. Необходимо провести сопряжение мониторинга технологического процесса в общей постановке к использованию синтезированной модели, представленной кортежами (3) и (4).



Рис. 5. Схема мониторинга технологического процесса

Примем для разметок следующие обозначения:

- $m(p_i)$ – разметка позиции $p_i \in P_{out}$;
- $M_{out}^{(k)} = \{m(p_i) \mid p_i \in P_{out}^{(k)}\}$ – множество разметок $m(p_i)$ выходных позиций $p_i \in P_{out}^{(k)}$ операции $S_k \in \hat{\mathcal{R}}$;
- $M_{out} = \{M_{out}^{(k)} \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}\}$ – множество разметок $M_{out}^{(k)}$ выходных позиций $p_i \in P_{out}^{(k)}$ операций $S_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}$ процесса $\hat{\mathcal{R}}$.

Таким образом, параметры процесса, представленного кортежем (4), измеряются путем фиксации разметок $m(p_i)$ позиций $p_i \in P_{out}$, $p_i \mid i \in I_P$ из множества P_{out} для каждой операции $S_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}$ во множестве M_{out} . Для непрерывного наблюдения формируется кортеж X разметок M_{out} : $X = \langle M_{нач\ out}, \dots, M_{i\ out}, \dots, M_{кон\ out} \rangle$, где $M_{нач\ out}$ можно обозначить через x_1 – начальное состояние процесса; $M_{i\ out} = x_i$ – i -е состояние процесса; $M_{кон\ out} = x_f$ – конечное, или финальное, состояние процесса. Кортеж X формируется в требуемые (задаваемые) моменты или этапы (сечения) моделируемого процесса.

Операция вычисления характеристик состоит в применении при необходимости к элементу x_i кортежа X оператора преобразования с целью вычисления требуемой характеристики y_i .

Формально операция контроля характеристик процесса может быть описана следующим образом.

Введем следующие необходимые обозначения:

- $m_{гр}(p_i)$ – заданная (требуемая или ожидаемая) разметка позиции $p_i \in P_{out}$;
- $M_{гр\ out} = \{M_{гр\ out}^{(k)} \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}\}$ – множество заданных (требуемых или ожидаемых) разметок $M_{гр\ out}^{(k)}$ выходных позиций $p_i \in P_{out}^{(k)}$ операций $S_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}$ процесса $\hat{\mathcal{R}}$;
- $X_{гр} = \langle M_{гр\ нач\ out}, \dots, M_{гр\ i\ out}, \dots, M_{гр\ кон\ out} \rangle$ – кортеж разметок $M_{гр\ out}$, позволяющий определить упорядоченный перечень заданных (требуемых или ожидаемых) разметок $M_{гр\ out}$ процесса $\hat{\mathcal{R}}$ на интервале контроля;
- $\Delta m(p_i)$ – невязка разметок $m(p_i)$ и $m_{гр}(p_i)$;
- $\Delta M_{out} = \{\Delta M_{out}^{(k)} \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}\}$ – множество невязок разметок $M_{out}^{(k)}$ и $M_{гр\ out}^{(k)}$ выходных позиций $p_i \in P_{out}^{(k)}$ операций $S_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}$ процесса $\hat{\mathcal{R}}$;
- $\Delta X = \langle \Delta M_{нач\ out}, \dots, \Delta M_{i\ out}, \dots, \Delta M_{кон\ out} \rangle$ – кортеж невязок разметок M_{out} и $M_{гр\ out}$, позволяющий определить траекторию невязок на интервале контроля.

Вычисление невязки «нижнего уровня» заключается в операции вычитания:

$$\Delta m(p_i) = m(p_i) - m_{\text{тр}}(p_i).$$

Аналогичные выражения можно составить и для вычисления невязок $\Delta M_{\text{out}}^{(k)}$, ΔM_{out} и ΔX .

Операция анализа (прогноза развития) процесса заключается в применении оператора

$$\Psi : \Delta M_{i \text{ out}} \times M_{i \text{ out}} \rightarrow \Delta M_{(i+1) \text{ out}}.$$

Таким образом, оператор прогноза Ψ заключается в «прогнозировании» невязки $\Delta M_{(i+1) \text{ out}}$ на следующем шаге выполнения процесса на основе текущего состояния $M_{i \text{ out}}$ и текущей невязки $\Delta M_{i \text{ out}}$ моделируемого процесса. Целью прогноза является определение степени приближения прогнозируемой невязки к критическому значению $\Delta M_{\text{кр out}}$, которое потребует формирования корректирующих управляющих воздействий для ее компенсации.

При необходимости управляющих воздействий применяется соответствующая операция. Возможность их выполнения обусловлена наличием управляющих позиций – входных позиций в схеме модели операции (см. рис. 2). Рассмотрим порядок выбора управляющих воздействий.

Управление процессом – это целенаправленное изменение специальных (управляющих) параметров модели процесса, при которых достигается требуемое значение специальных (индикаторных) параметров. Последние являются показателями свойств модели процесса. В рамках СЛП управляющие параметры – разметки входных позиций, индикаторные параметры – разметки выходных позиций.

Для задания множества допустимых альтернатив выполнения модели процесса Δ_D может быть использовано отношение

$$\Delta_D : \Delta \times M_{\text{нач out}} \times M_{\text{кон out}} \times Q \rightarrow \Delta_D, \quad (11)$$

где Δ – множество всех вариантов развития технологического процесса; $M_{\text{нач out}}$ – множество начальных (исходных) состояний технологического процесса; $M_{\text{кон out}}$ – множество требуемых состояний технологического процесса; Q – множество отношений, ограничивающих выбор.

Так как множество P состоит из трех непересекающихся подмножеств $P_{\text{вн}}$, P_{in} и P_{out} , правомерным будет записать

$$M : M_{\text{вн}} \times M_{\text{in}} \times M_{\text{out}},$$

причем $\text{card}(M) = \text{card}(M_{\text{вн}}) \cdot \text{card}(M_{\text{in}}) \cdot \text{card}(M_{\text{out}})$, где $M_{\text{вн}}$, M_{in} и M_{out} – множества возможных разметок схем операций (рис. 1, 2), состоящих из, соответственно, только внутренних, входных и выходных позиций $P_{\text{вн}}$, P_{out} и P_{in} .

Из всей совокупности множества позиций $P = \{p_i | i \in I_P\} = \{P_{\text{вн}}, P_{\text{in}}, P_{\text{out}}\}$ необходимо выделить множество P_{out} , так как именно это множество отражает состояние операции, и по смене разметок только этих позиций будет приниматься решение о наблюдаемом (текущем) состоянии моделируемой операции. Среди элементов множества M_{out} должны находиться и некоторые элементы $M_{\text{нач out}}$ и $M_{\text{кон out}}$, обозначающие, соответственно, начальное и конечное (требуемое) состояние технологической операции. Данные разметки должны входить, как минимум, в один кортеж разметок

сети. При наличии нескольких подобных кортежей операция должна допускать альтернативы выполнения.

Для всего технологического процесса

$$M_{\text{нач out}} = \{M_{\text{нач k out}} | k = \overline{1, \text{card}(I_S)}\};$$

$$M_{\text{кон out}} = \{M_{\text{кон k out}} | k = \overline{1, \text{card}(I_S)}\}.$$

Последние выражения обозначают начальные и конечные разметки выходных позиций обобщенных схем всех операций технологического процесса. Данные множества для каждого $k = \overline{1, \text{card}(I_S)}$ могут иметь как единичную мощность, так и мощность более единицы. В первом случае краевые условия задаются точно, во втором случае краевые условия на состояния технологического процесса задаются в виде интервала значений.

Состояние технологической операции изменится после подачи управляющих сигналов на входные позиции P_{in} или формирования некоторой разметки $M_{t \text{ in}} \in M_{\text{in}}$. Вследствие срабатывания разрешенных переходов сети будет сформирована новая разметка сети $M_{t'} : M_{t' \text{ вн}} \times M_{t' \text{ in}} \times M_{t' \text{ out}}$ и технологическая операция перейдет в новое состояние, т. е. операция будет выполняться. Таким образом, элементарный кортеж $\langle M_t, M_{t'} \rangle$ описывает минимальный фрагмент траектории выполнения или развития технологической операции. Однако в выражении (11) для составления множества Δ целесообразно использовать только «управляющую» часть кортежа разметок $M_{t'} : M_{t' \text{ вн}} \times M_{t' \text{ in}} \times M_{t' \text{ out}}$, а именно кортеж множеств разметок $M_{\text{in}} : P_{\text{in}} \rightarrow N$ входных позиций P_{in} по причине выбора именно среди них в некотором смысле оптимального управления моделируемым процессом.

В итоге именно кортеж множеств разметок $M_{\text{in}} : P_{\text{in}} \rightarrow N$ является кортежем управляющих воздействий Δ .

В рамках моделей (3) и (4) множество Δ_D будет содержать возможные кортежи разметок входных позиций обобщенной схемы операции применительно к каждому элементу множества $S = \{S_k | k = \overline{1, \text{card}(I_S)}\}$. В итоге можно записать

$$\Delta_D = \{\Delta_t = \langle M_{\text{нач in } t}, \dots, M_{\text{кон in } t} \rangle_t, t = \overline{1, \text{card}(\Delta_D)}\}. \quad (12)$$

Выражение (12) формализует управление моделью процесса через воздействие на входные позиции в каждый момент получения меток смены событий.

Таким образом, рассмотрена операция формирования управляющих воздействий (рис. 5).

Операция изменения состояния модели процесса на рис. 5 заключается в формировании очередной разметки выходных позиций M_{out} по результатам применения к модели процесса \mathfrak{H} очередной разметки входных позиций M_{in} , с помощью функции инцидентности \mathfrak{Z} входящей в кортеж (4).

ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Для анализа эффективности применения СЛП для мониторинга технологических процессов при обработке и анализе измерительной информации РКТ была создана модель технологического процесса функционирования пневмогидравлической системы РН «Союз-2» на этапах подготовки к пуску, пуску и полета изделия. Спецификация такого технологиче-

ского процесса, согласно технической документации, содержала 176 операций. Для измерения физических процессов используется 59 телеметрируемых параметров.

В качестве эталона использовано штатное специальное программное обеспечение (СПО) мониторинга технологических процессов, в основе которого используется рекурсивная модель процесса [13]. Время мониторинга всех операций с использованием применяемой рекурсивной модели составляет примерно 3 часа. При этом полнота используемой информации крайне недостаточна из-за ограниченности моделирующей мощности рекурсивной модели: в синтезированной модели учитывалось в среднем 15% (сигнального типа) доступных к использованию телеметрируемых параметров, технологических операций и возможных нештатных ситуаций. Синтезированная модель как инструмент мониторинга крайне слабо приспособлена для верификации и модификации.

Информационная технология мониторинга на основе СЛП позволила синтезировать модель рассматриваемого технологического процесса на качественно и количественно ином уровне. В 3 раза была повышена оперативность мониторинга, т. е. в 3 раза уменьшено время полного анализа всех операций согласно технической документации. Полнота используемой информации была повышена до 80%, не использовалась лишь часть измерительной информации, формируемая наземной системой измерений. Благодаря повышению моделирующей мощности практически полностью учтены возможные нештатные ситуации (аварийные выключения двигателей), кроме того, достигнута большая глубина моделирования технологических операций. Реализованы алгоритмы автоматизированной верификации синтезированной модели. Значительно повышена модифицируемость синтезированной модели процесса, благодаря чему снижаются затраты на синтез новой модели при изменении прототипа заводом-изготовителем.

Применение процедур снижения ресурсной ресурсоемкости [14] позволило реализовать модель процесса функционирования рассматриваемой системы на ЭВМ с широко распространенными характеристиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурно-логический подход заключается в представлении структуры технологического процесса мультиагентным комплексом операций на основе совокупности универсальных схем. Логика технологического процесса реализуется отношениями между универсальными схемами и системой ограничений.

Мониторинг технологического процесса, модель которого создана с помощью СЛП, заключается в выполнении задач формирования спецификации, синтеза модели, проверки ее адекватности спецификации, верификации модели и непосредственно мониторинга.

Приведенные краткие сведения о практической апробации технологии мониторинга в виде СПО на основе СЛП позволяют сделать вывод о повышении качества мониторинга по сравнению с используемой в настоящее время рекурсивной моделью технологического процесса.

Разработанный СЛП рекомендуется применять при создании СПО мониторинга сложных технологических процессов, содержащих взаимозависимые операции и использующих измерительную информацию для определения траектории

своего развития, подлежащих одновременно и временному, и событийному контролю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майданович О. В. Теория и практика построения автоматизированных систем мониторинга технического состояния космических средств: моногр. / О. В. Майданович, В. А. Каргин, В. В. Мышко и др. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2011. 219 с.
2. Шмелев В. В. Сравнительный анализ структурно-логического подхода к моделированию технологических процессов функционирования ракетно-космической техники / В. В. Шмелев, М. Ю. Охтилев // Информационно-управляющие системы, 2016, № 5 (84). С. 35-44.
3. Шмелев В. В. Модели технологических процессов функционирования космических средств / В. В. Шмелев // Авиакосмическое приборостроение, 2015, № 4. С. 78-93.
4. Ахметов Р. Н. Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовкой и пуском ракеты космического назначения «Союз-2»: новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению / Р. Н. Ахметов, И. Е. Васильев, В. А. Капитонов и др. // Авиакосмическое приборостроение, 2015, № 4. С. 3-54.
5. Майданович О. В. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий / О. В. Майданович, М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов // Прил. к журн. «Информационные технологии», 2011, № 10. 32 с.
6. Куренков В. И. Конструкция и проектирование изделий ракетно-космической техники. Ч. 2. Основы проектирования ракет-носителей / В. И. Куренков. – Самара: Самар. гос. аэрокосмич. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2012. 304 с.
7. Котов В. Е. Сети Петри / В. Е. Котов. – Л.: Наука, 1984. 160 с.
8. Westergaard M., Kristensen L. M. The Access/CPN Framework: A Tool for Interacting with the CPN Tools Simulator / M. Westergaard // Proc. of 30th Int. Conf. Appl. and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2009). Lecture Notes in Comput. Sci. 5606. Berlin: Springer-Verlag, 2009. P. 313-322.
9. Jensen K. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modeling and Validation of Concurrent Systems / K. Jensen, L. M. Kristensen, L. Wells // Int. J. Software Tools for Technol. Transfer (STTT), 2007, № 9 (3-4). P. 213-254.
10. Ratzer A. V. CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets / A. V. Ratzer, L. Wells, H. M. Lassen, M. Laursen et al. // Proc. of 24th Int. Conf. Appl. and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2003). Lecture Notes in Comput. Sci. 2679. Berlin: Springer-Verlag, 2003. P. 450-462.
11. Охтилев М. Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа: моногр. / М. Ю. Охтилев. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 1999. 162 с.
12. Clarke E. M. Model Checking / E. M. Clarke, O. Grumberg, D. Peled // MIT Press, 1999. 314 p.
13. Лескин А. А. Сети Петри в моделировании и управлении / А. А. Лескин, П. А. Мальцев, А. М. Спиридов. – Л.: Наука, 1989. 133 с.
14. Шмелев В. В. Вычислительная ресурсоемкость сетевой модели обработки и анализа измерительной информации ракеты-носителя «Союз-2» / В. В. Шмелев, Ю. С. Мануйлов // Информация и космос, 2016, № 1. С. 155-161.

Method for Monitoring the Technological Processes in the Aerospace Industry on the Basis of Structural and Logical Approach

Shmelev V. V.

Military Space Academy named Mozhaiskogo
St. Petersburg, Russia
valja1978@yandex.ru

Annotation. This article contains the original structural and logical approach to modeling processes. As an initial description of the process used by its specification, to which are conventional ways of describing process. The approach comprises the steps of synthesis model adequacy test its prototype, the model verification and directly monitoring process using a synthetic model. The approach is different modeling capacity, fully corresponding domain processing and analysis of measurement information of missile technology. Brief information on the practical testing of the approach, showing its advantage over currently used in the practice approach based on recursive model.

Keywords: rocket and space technology, process monitoring, structural and logical approach, recursive process model, process modeling, Petri net, multiagent approach to modeling.

REFERENCES

1. Maidanovich O. V., Kargin V. A., Myshko V. V., Okhtilev M. Iu., Sokolov B. V. Theory and Practice of Building Automated Systems for Monitoring the Technical Condition of Space Vehicles [Teoriia i praktika postroeniia avtomatizirovannykh sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoianiia kosmicheskikh sredstv]: monogr. St. Petersburg, Military Space Academy named Mozhaiskii, 2011. 219 p.
2. Shmelev V. V., Ohtilev M. Yu. Comparative Analysis of Structural and Logical Approach to the Modeling of Processes of Functioning of Rocket and Space Technology [Sravnitel'nyy analiz strukturno-logicheskogo podhoda k modelirovaniyu tekhnologicheskikh processov funkcionirovaniya raketno-kosmicheskoy tekhniki], *Information and Control Systems [Informacionno-upravlyayushchie sistemy]*, 2016, no. 5 (84), pp. 35-44.
3. Shmelev V. V. Models of Processes of Functioning of Space Assets [Modeli tekhnologicheskikh processov funkcionirovaniya kosmicheskikh sredstv], *Aerospace Instrument [Aviakosmicheskoe priborostroenie]*, 2015, no. 4, pp. 78-93.
4. Akhmetov R. N., Vasil'ev I. E., Kapitonov V. A., Okhtilev M. Iu., Sokolov B. V. Concept Creation and Application of Promising Automation Training and Start-up Space Purposes "Soyuz-2" Missiles, New Approaches to the Integration of Intellectualization, the Management [Kontseptsiiia sozdaniia i primeneniia perspektivnoi ASU podgotovkoi i puskom rakety kosmicheskogo naznacheniia «Soyuz-2»: novye podkhody k integratsii, intellektualizatsii, upravleniiu]. *Aerospace Instrument [Aviakosmicheskoe priborostroenie]*, 2015, no. 4, pp. 3-54.
5. Maidanovich O. V., Okhtilev M. Iu., Sokolov B. V., Iusupov R. M. Integrated Automation of Monitoring the Status of Space Assets on the Basis of Intelligent Information Technologies [Kompleksnaia avtomatizatsiia monitoringa sostoianiia kosmicheskikh sredstv na osnove intellektual'nykh informatsionnykh tekhnologii], *Supplement to the Information Technology [Prilozhenie k zhurnalu Informatsionnye tekhnologii]*, 2011, no. 10, 32 p.
6. Kurenkov V. I. Design and Engineering Space Engineering. Part 2: Fundamentals of Rockets [Konstrukciya i proektirovanie izdelij raketno-kosmicheskoy tekhniki. Chast' 2. Osnovy proektirovaniya raket-nositelej], Samara, Samar. gos. aehrokosm. un-t im. S. P. Koroleva (nac. issled. un-t), 2012, 304 p.
7. Kotov V. E. Petri Nets [Seti Petri], Leningrad, Nauka, 1984, 160 p.
8. Westergaard M., Kristensen L. M. The Access/CPN Framework: A Tool for Interacting with the CPN Tools Simulator. *Proc. of 30th Int. Conf. Appl. and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2009). Lecture Notes in Comput. Sci.* 5606, Berlin, Springer-Verlag, 2009, pp. 313-322.
9. Jensen K., Kristensen L. M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems. *Int. J. Software Tools for Technol. Transfer (STTT)*, 2007, no. 9 (3-4), pp. 213-254.
10. Ratzer A. V., Wells L., Lassen H. M., Laursen M., Qvortrup J. F., Stissing M. S., Westergaard M., Christensen S., Jensen K. CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets, *Proc. of 24th Int. Conf. Appl. and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2003). Lecture Notes in Comput. Sci.* 2679, Berlin, Springer-Verlag, 2003, pp. 450-462.
11. Okhtilev M. Iu. Basic Theory of the Automated Analysis of the Measuring Data in Real Time. Synthesis Analysis [Osnovy teorii avtomatizirovannogo analiza izmeritel'noi informatsii v real'nom vremeni. Sintez sistemy analiza], St. Petersburg, Military Space Academy named Mozhaiskii, 1999, 162 p.
12. Clarke E. M., Grumberg O., Peled D. Model Checking, MIT Press, 1999. 314 p.
13. Leskin A. A., Mal'cev P. A., Spiridonov A. M. Petri Nets in Modeling and Management [Seti Petri v modelirovanii i upravlenii], Leningrad, Nauka, 1989, 133 p.
14. Shmelev V. V., Manuilov Iu. S. Computer Network Resource Consumption Model Measuring Data Processing and Analysis of Carrier Rocket "Soyuz-2" [Vychislitel'naia resursoemkost' setevoi modeli obrabotki i analiza izmeritel'noi informatsii rakety-nositelia «Soyuz-2»], *Information and Space [Informatsiia i kosmos]*, 2016, no. 1, pp. 155-161.