

УДК 004.94:510.67

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ
НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

К.т.н. В.В. ШМЕЛЕВ

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского
197198 г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13
E-mail: vka@mil.ru

В статье предлагается графовая модель технологического процесса в виде совокупности универсальных схем, созданных на основе сетей Петри. Модель обеспечивает возможность управления траекторией развития процесса. Описывается структурно-логический подход к формализации модели технологической операции, используемой при создании информационной технологии управления технологическими процессами.

Ключевые слова: сети Петри, моделирование технологических процессов, информационные технологии в промышленности.

Известно [1], что технологический процесс (ТП) – совокупность операций, выполнение которых в установленной последовательности преследует определенную цель. Данная цель заключается в изменении или определении состояния объекта воздействия. Под объектом воздействия понимается объективно существующий предмет (например, техническая система) или нематериальная сущность (например, результаты измерений параметров – измерительная информация).

ТП характеризуется своей эффективностью – комплексной характеристикой потенциальных и (или) реальных результатов (интегральный эффект) реализации ТП с учетом степени удовлетворения этими результатами целей ТП. Под результатами понимаются показатели всех видов ресурсопотребления ТП, а также других видов количественных и качественных характеристик ТП [2]. Тогда управление ТП можно определить как комплекс мероприятий, направленных на максимизацию его эффективности.

В качестве наиболее общих вариантов управляющего воздействия на ход ТП следует назвать запуск, приостановку, возобновление выполнения и окончание технологической операции (ТО) по внешней команде. Приостановка выполняемой в настоящий момент времени ТО является обязательным этапом изменения траектории ТП. Под изменением траектории ТП понимается любое изменение заранее предусмотренного плана выполнения ТП. Созданная модель ТП должна обеспечивать возможность реализации всех вариантов управляющего воздействия.

В практике производства, испытания и применения ракетно-космической техники при выполнении ТО, предусматривающих возможность вариации траектории ТП, вводятся специальные показатели и критерии. Измерение или расчет данных характеристик и

сравнение их с критериями определяют следующую ТО или требуют прекратить текущую ТО.

Таким образом, управление ТП возможно переопределить как комплекс операций, направленных на максимизацию его эффективности, и состоящий из типовой совокупности приостановки (прекращения) текущей ТО и начала другой ветви ТП.

В работе [3] предложен алгоритм синтеза модели ТП на основе сетей Петри. Основное содержание работы посвящено преобразованию информации о ТП из используемых в практике испытаний и применения форм представления ракетно-космической техники, то есть непосредственно синтезу модели ТП. Вопросам функционирования модели в режимах отслеживания, контроля, корректировки и управления ТП внимание уделено только с общих позиций возможной организации. Описывается порядок выполнения указанных этапов на предлагаемой модели и раскрывается содержимое структурно-логического подхода к описанию формальной модели ТП.

1. Управление моделью ТП

ТП может быть определен как динамическая система, поскольку его развитие подчинено принципу причинности [4], то есть текущее состояние ТП зависит не от будущего управляющего воздействия, а только от предыдущего состояния ТП и выданных ранее воздействий. По данной причине можно утверждать, что идентифицируемость – свойство динамической системы. Известно [5], что с позиции системного подхода идентифицируемость ТП достигается путем придания модели ТП свойств наблюдаемости и управляемости. Под наблюдаемостью понимается свойство модели ТП, характеризующее потенциальную возможность определения её начального или какого-либо текущего состояния по результатам анализа её некоторых выходных характеристик. Под управляемостью понимается свойство модели ТП, характеризующее потенциальную возможность перевода модели из заданного в требуемое состояние путем подачи на её вход управляющих воздействий, выбираемых из числа допустимых.

На рис. 1 представлена схема модели ТП, обладающая свойствами наблюдаемости и управляемости.

Рассмотрим функционирование схемы. Кружками и прямоугольниками показаны классические позиции и переходы сетей Петри [6]. Полукругом с выходящей стрелкой показаны позиции, фишки в которых формируются внешними схемами – управляющими относительно рассматриваемой. Полукругом с исходящей стрелкой показаны позиции, фишки в которых формируются данной схемой, но используются они в других схемах – управляемых относительно рассматриваемой. Дуга с двумя стрелками является сбрасывающей, то есть она

извлекает из позиции все фишки одновременно за один такт срабатывания перехода. Дуга с началом в малом кружке является извлекающей, то есть она не переносит фишку в прямом направлении от начала дуги к стрелке и извлекает ее из целевой позиции. Дуги с обозначением $\langle \dots \rangle$ являются кратными. Дуги с двунаправленными стрелками – возвращающими.

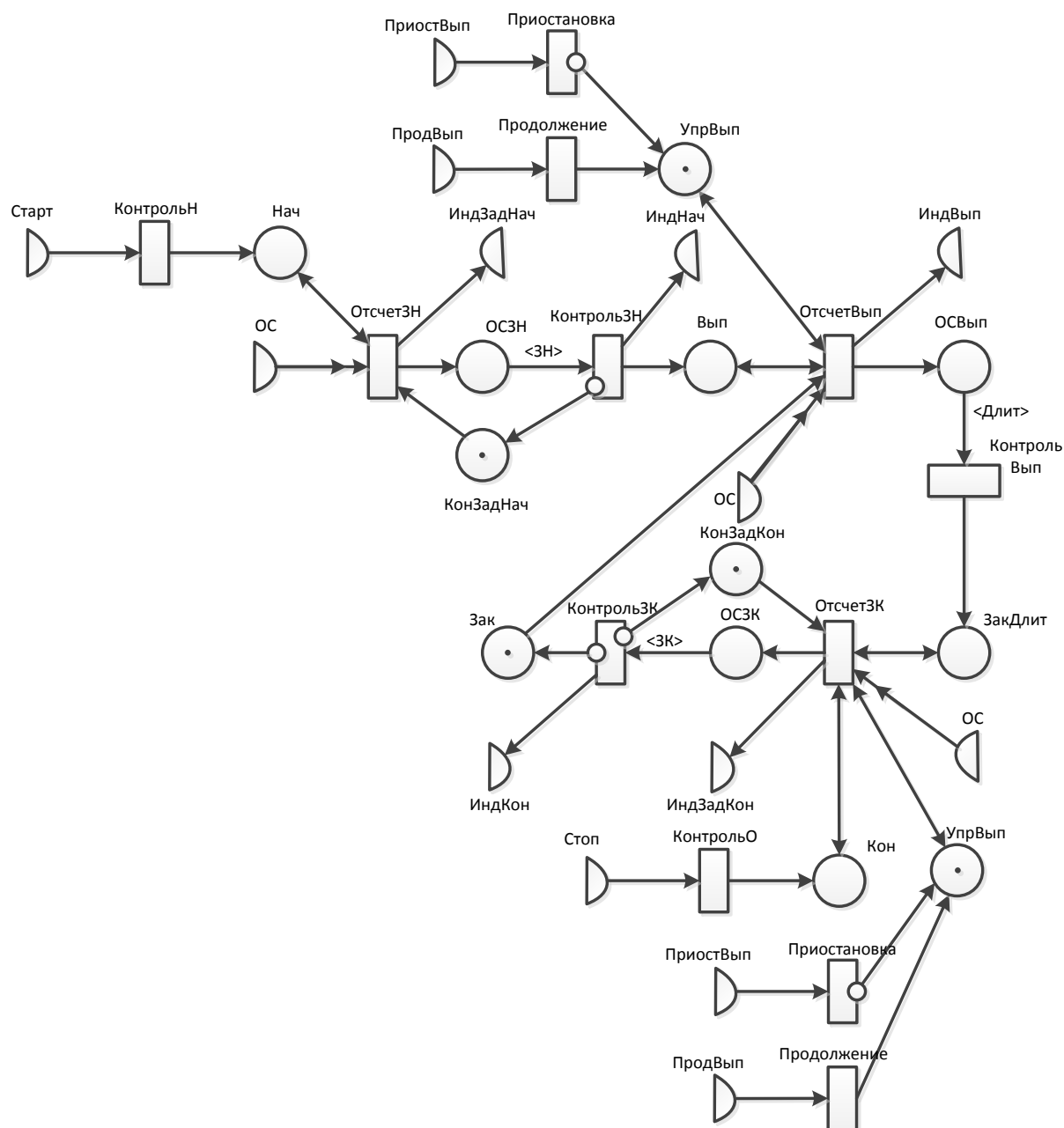


Рис. 1. Схема модели ТП

Позиции «Старт», «Стоп», «ПриостВып» (приостановка выполнения ТО) и «ПродВып» (продолжение выполнения ТО) являются позициями, содержащими управляющие сигналы от внешних схем. Получение фишек данными позициями приводит к началу выполнения ТО («Старт»), к окончанию выполнения ТО («Стоп»), к временной

приостановке и продолжению выполнения ТО. Данные позиции обеспечивают выполнение требования управляемости модели ТП. Управляющие позиции можно считать бинарными, так как они могут быть в двух состояниях: «Нет ни одной фишки» и «Есть только одна фишка».

Позиция «ОС» содержит отсчеты событий, используемые для смены состояния модели ТП. В качестве таких событий могут выступать метки времени или факты наступления событий при осуществлении контроля не временных, а событийных процессов. Позиция «ОС» по содержанию является бинарной, поскольку последующими переходами обрабатывается только факт прихода отсчета, но не количество ранее совершившихся событий (то есть количество имеющихся в позиции «ОС» фишек). Это обеспечивается за счет использования сбрасывающих дуг.

Позиции «ИндЗадНач» (индикация степени отсчета задержки начала ТО), «ИндНач» (индикация фактического старта выполнения ТО), «ИндВып» (индикация степени выполнения ТО), «ИндЗадКон» (индикация степени отсчета задержки окончания ТО) и «ИндВып» (индикация фактического окончания выполнения ТО) являются индикационными и обеспечивают наблюдаемость модели ТО. Данные позиции должны использоваться внешними схемами для определения траектории развития ТП в целом путем сравнения значений в данных позициях с некоторыми эталонами. Управляющие позиции «ИндЗадНач», «ИндВып» и «ИндЗадКон» являются по содержанию счетными, т.к. содержат количество отсчетов событий, полученных за соответствующий интервал. Позиции «ИндНач» и «ИндВып» являются бинарными, так как смылосодержащими являются только состояния отсутствия и наличия фишек.

Без индикационных и управляющих позиций схема модели ТП способна только моделировать ход ТП без возможности контроля и управления ТП.

Переход «КонтрольН» (контроль начала) срабатывает при получении фишки управляющей бинарной позиции «Запуск». Позиция «Нач» (начало) в этот момент получит сигнал о разрешении отсчета задержки начала выполнения ТО переходом «ОтсчетЗН» (отсчет задержки начала). Таким образом, реализуется разрешение выполнения ТО. Однако фактически ТО начнет выполняться только после отсчета задержки, определяемой значением кратности дуги $\langle 3Н \rangle$ (задержка начала).

Переход «ОтсчетЗН» будет срабатывать каждый раз по наступлении элементарного события в позиции «ОС». Позиция «ОСЗН» (отсчет событий задержки начала) будет содержать количество отсчитанных событий после начала отсчета задержки начала выполнения ТО. При достижении в данной позиции количества отсчетов, равного значению «ЗН», сработает переход «КонтрольЗН» (контроль задержки начала). Тогда позиция «Вып»

(выполняется) получит сигнал о разрешении фактического выполнения ТО. Индикационная позиция «ИндЗадНач» будет «выводить» степень отсчета задержки начала фактического выполнения ТО в виде количества событий, пройденных с момента разрешения выполнения ТО. Позиция «ИндНач» «выводит» сигнализирующую информацию о фактическом начале выполнения ТО. Позиция «КонЗадНач» (окончание отсчета задержки начала фактического выполнения ТО) в начальной разметке содержит разрешающую фишку. По срабатывании перехода «Контроль ЗН» данная фишка извлекается из позиции, и тем самым запрещается дальнейшее срабатывание перехода «Отсчет ЗН». Это осуществляется для ограничения индикации в позиции «ИндЗадНач» количества событий значением ЗН.

Переход «ОтсчетВып» (отсчет фактического выполнения) будет срабатывать по наступлении элементарных событий (позиция «ОС»). На выходе данного перехода позиция «ОСВып» (отсчет событий выполнения) будет содержать количество событий, прошедшее с момента начала фактического выполнения ТО. При равенстве данного количества заданному количеству «Длит» (длительность) сработает переход «КонтрольВып» (контроль выполнения). Позиция «ЗакДлит» (закончить по длительности) получит сигнал о том, что ТО может быть окончена по длительности. Однако фактически она будет окончена после отсчета задержки окончания ТО. Индикационная позиция «ИндВып» будет содержать количество событий, отсчитанное после начала фактического выполнения ТО.

Управление ходом ТО осуществляется, в том числе, благодаря обеспечению возможности приостановки ТО с помощью управляющих позиций «ПриостВып» и «ПродВып». Получение фишки бинарной позицией «ПриостВып» приводит к срабатыванию перехода Приостановка. Данный переход извлекает разрешающую отсчет фишку из позиции «УпрВып» (управление выполнением ТО), вследствие этого перестает срабатывать переход «ОтсчетВып» и приостанавливается формирование информационных фишек в позиции «ИндВып» и фишек в позиции «ОСВып». Получение фишки позицией «ПродВып» вызовет срабатывание перехода Продолжение, который возвратит разрешающую отсчет фишку в позицию «УпрВып».

Фактически ТО закончится только после отсчета количества событий, определяющих задержку окончания ТО, которая равна кратности дуги «ЗК» (задержка фактического окончания ТО). Реализуется данный процесс аналогично подсчету событий, определяющих задержку начала ТО. Переход «ОтсчетЗК» (отсчет задержки окончания) будет срабатывать каждый раз по наступлении элементарного события в позиции «ОС». Позиция «ОСЗК» (отсчет событий задержки окончания) будет содержать количество отсчитанных событий после начала контроля задержки окончания выполнения ТО. При достижении в данной позиции количества отсчетов, равного значению «ЗК» сработает переход «КонтрольЗК»

(контроль задержки окончания). Тогда из позиции «Зак» (ТО фактически закончена) будет извлечена фишка, и тем самым будет прекращен отсчет длительности фактического выполнения ТО переходом «ОтсчетВып». Индикационная позиция ИндЗадКон будет «выводить» степень отсчета задержки фактического окончания выполнения ТО в виде количества событий, пройденных с момента разрешения окончания выполнения ТО по длительности (позиция «ЗакДлит»). Позиция «ИндКон» «выводит» сигнализирующую информацию о фактическом окончании выполнения ТО. Позиция «КонЗадКон» (окончание отсчета задержки фактического окончания выполнения ТО) в начальной разметке содержит разрешающую фишку. По срабатывании перехода Контроль «ЗК» данная фишка извлекается из позиции, и тем самым запрещается дальнейшее срабатывание перехода «ОтсчетЗК». Это осуществляется для ограничения индикации в позиции «ИндЗадКон» количества событий значением «ЗК».

Совокупность позиции «Останов» (остановка), перехода «КонтрольО» (контроль окончания) и позиции «Кон» (окончание) выполняет задачу ввода в универсальную схему значения управляющего параметра «Останов», который определяет разрешение фактического окончания ТО. Переход «КонтрольО» срабатывает при смене с запретительного в разрешающее значение управляющего бинарного параметра «Останов». Позиция «Кон» в этот момент получит сигнал о разрешении отсчета задержки фактического окончания выполнения ТО переходом «ОтсчетЗК».

Приостановка выполнения ТО на этапе отсчета задержки окончания ТО осуществляется аналогичным способом, как и на этапе ее выполнения.

Представленная на рис. 1 схема модели ТП является максимально общей по возможности наблюдения и управления состоянием ТП. Ветвление траектории развития ТП обеспечивается связями между ТО, то есть наличием управляемых и управляющих ТО, которые должны интерпретироваться управляемыми и управляющими схемами.

2. Управляемые и управляющие схемы ТП

Рассмотрим алгоритм организации взаимоправления ТО при представлении модели ТО в виде схемы рис. 1. Для обеспечения взаимозависимости ТО в схеме используются индикационные и управляющие позиции (рис. 2).

На рис. 2 представлена взаимосвязь ТО_1 и ТО_2. ТО_1 является управляющей, так как формирование фишки в бинарной индикационной позиции «Инд_нач_1» вызывает одновременное формирование фишки в бинарной индикационной позиции «Стоп_2». Это по функциональной нагрузке данных позиций означает, что начало фактического выполнения

ТО_1 является условием остановки ТО_2. Таким образом, организуется слияние бинарных позиций.

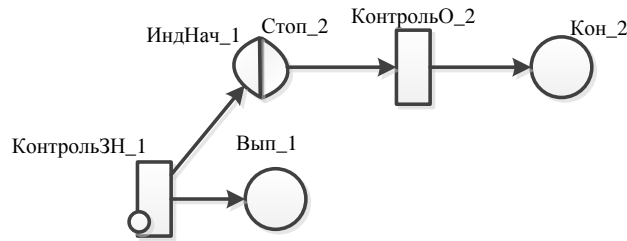


Рис. 2. Управляющая и управляемая схемы ТО

Слияние счетной индикационной позиции и бинарной управляющей позиции (все управляющие позиции – бинарные) осуществляется через дополнительный переход (рис. 3).

На рис. 3 представлена взаимосвязь ТО_1 и ТО_2. ТО_1 является управляющей. Переход «ПринРеш» (Принятие решения) сработает по достижении в позиции «ИндВып_1» количества фишек, равного «ГрРешОС» (Граница принятия решения в отсчетах событий). Таким образом, реализуется вариант управления операцией ТО_2, в котором формируется разрешающий начало операции ТО_2 сигнал по истечении длительности, заданной величиной «ГрРешОС», выполнения операции ТО_1. Это по функциональной нагрузке означает, что указанная длительность выполнения операции ТО1 является условием начала операции ТО_2. Таким образом осуществляется слияние счетной и бинарной позиций.

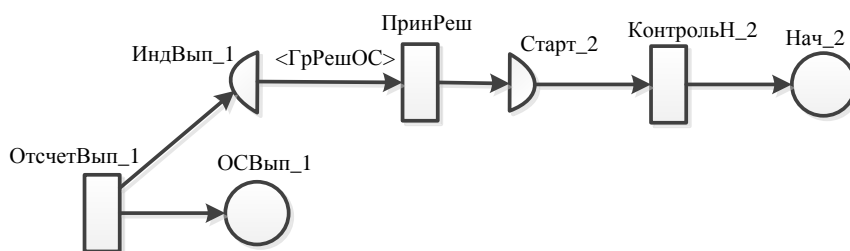


Рис. 3. Управляющая и управляемая схема ТО для случая управления по счетной индикационной позиции

Слияние бинарной и счетной позиций без промежуточного перехода не имеет смысла, так как бинарная позиция не может содержать более одной фишки.

3. Обобщенная схема ТО

По причине универсальности схемы ТО, приведенной на рис. 1, совокупность элементов за исключением входных и выходных позиций, может быть заменена специальным переходом-процедурой – универсальной схемой ТО (УСТО). Схема обобщения ТО приведена на рис. 4.

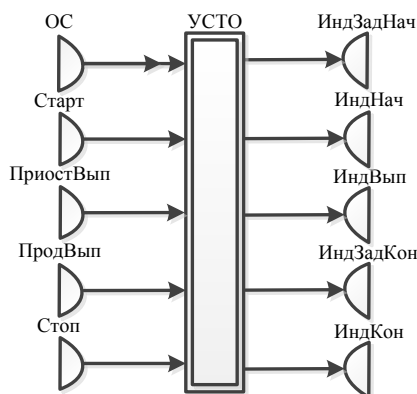


Рис. 4. Обобщенная схема ТО

Переход-процедура УСТО обозначен на рис. 4 прямоугольником с двойными линиями. В левой части приведены все входные позиции, определяющие ход ТО. В правой части приведены все выходные (индикационные) позиции, показывающие ход ТО.

По функциональности классический переход и переход-процедура являются элементами, передающими фишки из входа на выход. Но переход-процедура отличается от классического перехода тем, что для срабатывания перехода-процедуры не обязательно наличие фишек во всех входных позициях и при срабатывании не обязательно формирование фишек во всех выходных позициях. Перечень позиций, в которых формируются фишки, определяется логикой работы схемы модели ТП на рис. 1.

Таким образом, переход-процедура является только удобным средством компактного отображения процессов, когда вместо громоздкого объема внутренних позиций и переходов схемы модели ТП (рис. 1) используется только одно изображение перехода-процедуры.

Приведенная в материале модель может быть использована в качестве основы информационной системы автоматизированных синтеза, контроля и управления технологическими процессами в различных областях деятельности.

На рис. 5 представлена схема логического преобразования информации в такой системе. В квадратах приводятся процессы преобразования информации, в кругах – виды информации о состоянии ТП, объективно существующие и хранящиеся в разнородном виде.

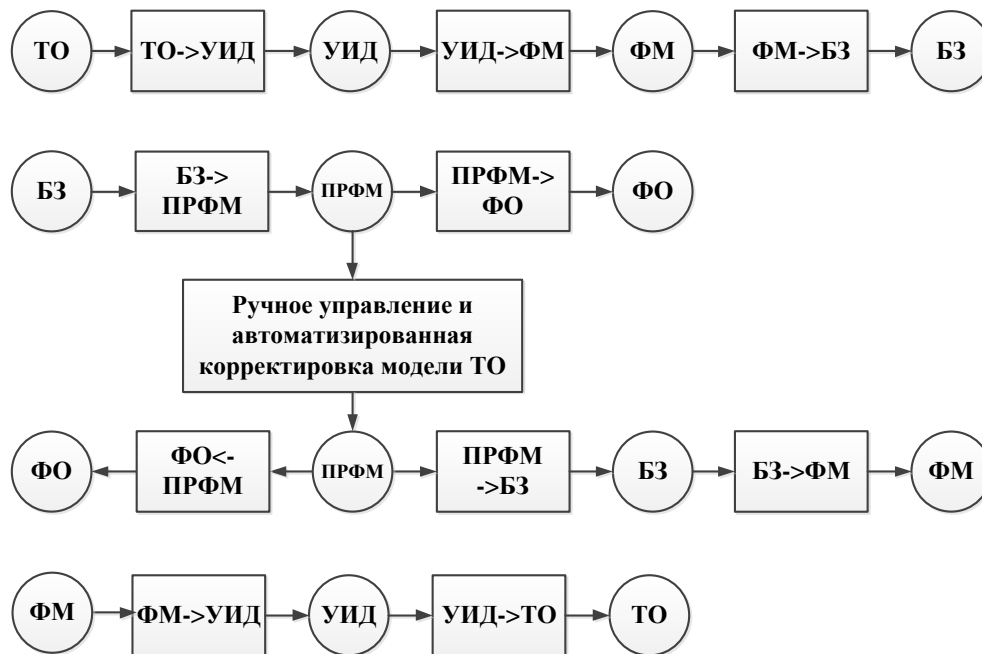


Рис. 5. Схема логического преобразования информации для модели ТП

На рис. 5 использованы следующие сокращения:

УИД – универсальные исходные данные – информация о каждой ТО в виде совокупности ее характеристик;

ФМ – формальная модель ТП в виде лингвистической системы;

БЗ – база знаний, программно реализованная и объективно существующая структура хранения и применения правил обработки и анализа информации об объекте управления;

ПРФМ – программная реализация формальной модели ТП;

ФО – форма отображения УС формальной модели ТП, используется для визуального контроля выполнения операций ТП. Для реализации процедуры используется шестой элемент ФМ – правила работы программы отображения.

Информация о ТО преобразуется в специализированный вид представления (таблицы хронометража, диаграммы Ганта и так далее), который затем переводится в УИД. Совокупность УИД, информации о функционировании ТП в виде предикатных (условных) выражений и правил работы ИС с использованием предлагаемой формальной модели описывается словоформами на специализированном искусственном языке. Данное описание должно быть сохранено в БЗ.

При непосредственной работе информационной системы (ИС) информация о ФМ из БЗ используется уже в виде ПРФМ на некотором языке программирования с помощью специализированного компилятора. ПРФМ позволяет, во-первых, автоматизировать работу

модели ТП, во-вторых, организовать взаимодействие оператора и модели ТП через специализированную ФО.

В ПРФМ, благодаря алгоритмизации и программной реализации процедур синтеза, контроля и корректировки модели ТП, возможно изменение оптимизируемых параметров с целью повышения результативности выполнения модели ТП.

4. Структурно-логический подход к управлению

При практической реализации информационной системы, выполняющей задачи автоматизированного синтеза, отслеживания, контроля и корректировки модели ТП, обязательно создание формальной модели операции, представляющей собой лингвистическую систему [7] из 6 элементов – множеств.

1. Конечное непустое множество терминальных символов. Данное множество содержит возможные в рамках выполняемой модели ТП варианты состояний каждой операции – варианты разметок каждой позиции универсальной схемы.
2. Конечное непустое множество нетерминальных символов, являющихся словами в создаваемой лингвистической системе. Каждый нетерминальный символ содержит совокупность терминальных символов, каждое слово имеет одинаковую мощность, равную общему количеству позиций в модели ТП.
3. Начальный и конечный нетерминальные символы. Это символы, которые не имеют, соответственно, предшествующего и последующего символов.

Слова формируются на основании правил вывода – четвертого (следующего) элемента модели ТП.

4. Правила формирования нетерминальных символов, выводимые из модели ТП. Данный элемент лингвистической системы содержит множество пар. Первым элементом каждой пары является нетерминальный символ, вторым – нетерминальный элемент, полученный путем реализации разрешенных входных и выходных функций позиций и переходов в исходном нетерминальном символе.
5. Множество предикатных выражений, используемых для реализации условных операций. Предикаты в обязательном порядке содержат перечень условий – логических выражений.
6. Правила работы программы информационной системы – совокупность пар. В каждой паре имеется первая часть – нетерминальный символ, вторая – символ, соответствующий действию исполнительной части информационной системы.

Элементы 1 – 3 определяют структуру моделируемого процесса в виде описания знаний (процедурных и декларативных) о процессе с помощью схем, созданных на основе

сетей Петри. Инструмент схем предоставляет возможность моделирования временных, условных и вложенных технологических операций.

Элементы 4 – 6 описывают логику развития моделируемого процесса в виде совокупности множеств правил вывода, а также дополнительных элементов, обеспечивающих адаптацию информационной системы к особенностям технологических процессов в предметной области.

Таким образом, структурно-логический подход заключается в графическом представлении структуры технологического процесса в виде совокупности универсальных схем операций (сетей Петри), а логика развития процесса (управление процессом) представляется связями между схемами. В формальном представлении данный подход заключается в описании схем с помощью лингвистической системы.

Список литературы

1. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий.
2. Резников, Б.А. Системный анализ и методы системотехники. Часть 1. Методология системных исследований и моделирование сложных систем: учебник // Б.А. Резников. – МО РФ, 1990.
3. Шмелев, В.В., Самойлов, Е.Б. Модели операций технологического процесса и контроля правильности их выполнения // В.В. Шмелев, Е.Б. Самойлов // Техника средств связи, 2013. – №4.
4. Мануйлов, Ю.С. и др. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник // Ю.С. Мануйлов. – СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010.
5. Калинин, В.Н., Резников, Б.А., Варакин, Е.И. Теория систем и оптимального управления. Часть 1. Основные понятия, математические модели и методы анализа систем // В.Н. Калинин, Б.А. Резников, Е.И. Варакин. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1989.
6. Котов, В.Е. Сети Петри / В.Е. Котов. – Издательство «Наука», 1984.
7. Актуальные вопросы автоматизированной обработки и анализа информационных процессов: учебное пособие. – МО РФ, 1992.