

УДК 004.94:510.67

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСЛЕПОЛЕТНОГО АНАЛИЗА  
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОДГОТОВКИ,  
ПУСКА И ПОЛЕТА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ СОЮЗ-2**

*В. В. Шмелев*, канд. техн. наук; *Ю. С. Мануйлов*, д-р техн. наук  
Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

*А. В. Евенко*  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

*Проведена апробация подхода к моделированию сложных технологических процессов с использованием модифицированных сетей Петри. Предлагаемый подход может быть использован при создании информационной технологии автоматизированного контроля процесса обработки и анализа измерительной информации по сложным техническим объектам.*

*Ключевые слова:* моделирование технологических процессов, сети Петри, телеметрическая информация, ракета-носитель Союз-2.

В [1] предложен подход к формализации комплексов операций по выполнению специальной задачи или достижению целевого эффекта при функционировании сложных технических систем. Предложена графовая модель технологического процесса в виде совокупности универсальных схем, созданных на основе модифицированных сетей Петри. Модель обеспечивает возможность управления траекторией развития процесса. Ветвление траектории развития технологического процесса обеспечивается наличием индикаторных, управляемых и управляющих позиций. Предлагались основные принципы информационной технологии управления технологическими процессами с использованием разработанного подхода.

Представляется целесообразным рассмотреть особенности применения данного подхода на конкретном технологическом процессе. В качестве такого процесса рассмотрим процесс слепополетного анализа телеметрической инфор-

мации (ТМИ), полученной по результатам подготовки, пуска и полета РН Союз-2.

Успешная практическая апробация описанного в [1] подхода позволит подтвердить достаточную адекватность мощности моделируемых процессов реальным технологическим процессам в предметной области анализа измерительной информации ракеты-носителя (РН).

**Современное решение задачи  
автоматизированного планирования и контроля  
технологических процессов обработки и анализа  
измерительной информации на космодроме**

Рассмотрим фрагменты реализованных решений по совершенствованию программно-алгоритмического обеспечения процессов обработки и анализа результатов пусков космических средств на базе измерительного комплекса космодрома. Внимание уделим методам, алгоритмам и программной реализации функций планирования, мониторинга и корректировки различных технологических процессов, реализуемых при анализе ЛТХ.

**Состав системы комплексного анализа  
результатов применения космических средств**

Система анализа результатов телеизмерений РН предназначена для обеспечения объективного контроля выполнения задач летных испытаний существующих и перспективных образцов ракетно-космической техники (РКТ) на основе

---

**Шмелев Валентин Валерьевич**, докторант.

E-mail: valja1978@yandex.ru

**Мануйлов Юрий Сергеевич**, профессор кафедры.

E-mail: manoff@inbox.ru

**Евенко Александр Валерьевич**, старший преподаватель учебного военного центра.

E-mail: evenko\_av@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 15 ноября 2015 г.*

© Шмелев В. В., Мануйлов Ю. С., Евенко А. В., 2016

реализации комплексного анализа всех видов измерительной информации по пускам и обучению.

В состав системы входят подсистемы:

- Комплексной оценки результатов испытаний изделий РКТ;
- Информационного обеспечения;
- Баллистико-навигационного обеспечения;
- Совместной обработки траекторных измерений и контроля качества работы траекторных средств;
- Анализа летно-технических характеристик (ЛТХ);
- Специального обеспечения анализа результатов пусков;
- Контроля качества работы телеметрических средств.

Все автоматизированные рабочие места (АРМ) подсистем территориально размещаются в помещениях информационно-аналитического центра космодрома.

#### ***Выполнения функций автоматизации планирования, мониторинга и корректировки процессов анализа ТМИ***

Объектом моделирования с использованием предлагаемого подхода является процесс планирования, мониторинга и корректировки технологических процессов, реализуемых при анализе ЛТХ образцов РКТ. В табл. 1 приведены функции подсистем, связанные с рассматриваемым направлением.

Рассмотрим способ реализации приведенных в табл. 1 функций. Функции "Отображение циклограммы пуска и полета изделий ракетно-космической техники на активном участке траектории" и "Прием и отображение циклограммы предстартовой подготовки и полета". Данные функции реализуются путем заполнения таблицы хронометража по форме, представленной на рис. 1.

В таблицу оператором в столбец "Команда" вносятся характерные моменты времени, значимые с позиции циклограммы работы агрегатов и систем РН, заносится "База" отсчета интервала для команды, ожидаемая (планируемая или модельная) длительность интервала "Интервал ПТР" и значения нижней и верхней границ допуска на фактическое значение интервала. В дальнейшем такая форма используется только для визуального контроля правильности прохождения команд.

Рассмотрим способ реализации функций "Планирование задач анализа ЛТХ", "Планирование и контроль выполнения задач системы анализа результатов телеизмерений РН", "Мониторинг процесса подготовки данных для отчета по результатам выполнения опытно-испытательных работ", "Разработка технологических планов (план-графиков) выполнения работ в различных формах" и "Контроль сроков выполнения мероприятий". Все указанные функции реализуются схожим с предыдущим способом заполнением таблицы по форме, представленной на рис. 2, а—в.

Таблица 1

**Функции подсистем, связанные с автоматизацией планирования, мониторинга и корректировки процессов анализа ТМИ**

Подсистема	Выполняемые функции
Система комплексной оценки результатов испытаний изделий РКТ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Разработка технологических планов (план-графиков) выполнения работ в различных формах</li> <li>• Контроль сроков выполнения мероприятий</li> </ul>
Система информационного обеспечения	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Планирование и контроль выполнения задач системы анализа результатов телеизмерений РН</li> <li>• Мониторинг процесса подготовки данных для отчета по результатам выполнения опытно-испытательных работ</li> <li>• Визуализация прохождения команд и докладов в период подготовки к пуску</li> <li>• Отображение циклограммы пуска и полета изделий ракетно-космической техники на активном участке траектории</li> </ul>
Система анализа летно-технических характеристик	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Планирование задач анализа ЛТХ</li> <li>• Управление процессами анализа ЛТХ изделий РКТ</li> <li>• Контроль и протоколирование процесса анализа ЛТХ</li> <li>• Прием и отображение циклограммы предстартовой подготовки и полета</li> </ul>

Информация о значении

Имя узла: Циклограмма полета

Тип узла: Циклограмма

Команда	База	Интервал ПТР	ТМИ	Мин. допуск	Макс. допуск
НР	-	0.0	ТМИ	-1.0	1.0
КП	-	0.0	ТМИ	-1.0	1.0
НРс	КП	8.0	ТМИ	-0.6	0.6
АВркс	КП	111.0	ТМИ	-0.61	0.63
КСТ	КП	112.0	ТМИ	-0.6	0.6
КСД	КСТ	4.04	ТМИ	-0.2	0.2
КР	КП	118.36	ТМИ	-0.35	0.4
ИКР	КП	118.36	ТМИ	-0.35	0.4
КРС 1	ИКР	0.31	ТМИ	-0.03	0.04
ВОД	КРС1	0.11	ТМИ	-0.01	0.04
НРкс 2	ИКР	6.0	ТМИ	-0.03	0.04
КСО	ИКР	43.0	ТМИ	-0.8	0.8
КГН	ИКР	155.0	ТМИ	-1.0	1.0
ГК 2	КП	285.05	ТМИ	-0.35	0.5
КЗ 2	КП	285.05	ТМИ	-0.35	0.5
ИКЗ 2	КЗ 2	1.0	ТМИ	-0.03	0.04
ИВД	КЗ 2	1.25	ТМИ	-0.03	0.04

Добавить строку | Удалить строку

Рис. 1. Форма отображения циклограммы предстартовой подготовки и полета РН

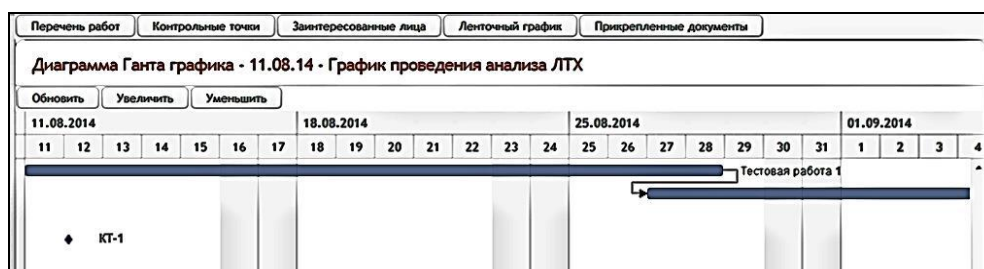
Перечень работ | Контрольные точки | Заинтересованные лица | Ленточный график | Прикрепленные документы

Перечень работ графика - 11.08.14 - График проведения анализа ЛТХ

Обновить | Добавить | Удалить | Изменить | Открыть

Наименование	Начало	Продолжительность, ч.	Окончание	Процент завершенности	Входит в критический путь <sup>⓪</sup>
Тестовая работа 1	11.08.2014 16:23:04	100	28.08.2014 11:53:04		<input checked="" type="checkbox"/>
Тестовая работа 2	28.08.2014 11:53:04	200	02.10.2014 11:53:04		<input checked="" type="checkbox"/>
Тестовая работа 3	02.10.2014 11:53:04	150	29.10.2014 9:53:04		<input checked="" type="checkbox"/>

а



б

Все работы

Обновить

Наименование	Наименование графика	Начало	Окончание	Процент завершенности	Исполнитель <sup>⓪</sup>
Тестовая работа 1	11.08.14 - График проведения анализа ЛТХ	11.08.2014 16:23:04	28.08.2014 11:53:04		Иван Петрович Иванов
Тестовая работа 2	11.08.14 - График проведения анализа ЛТХ	28.08.2014 11:53:04	02.10.2014 11:53:04		Петр Иванович Петров
Тестовая работа 3	11.08.14 - График проведения анализа ЛТХ	02.10.2014 11:53:04	29.10.2014 9:53:04		Алексей Иванович Николаев

в

Рис. 2. Форма:

а — планирования процессов анализа ЛТХ в виде таблицы хронометража; б — планирования процессов анализа ЛТХ в виде диаграммы Ганта; в — мониторинга процессов анализа ТМИ

На рис. 2, а представлена форма планирования процессов анализа ЛТХ в виде таблицы хронометража. Ее использование заключается в последовательном заполнении данных о наименовании операции и ее временных характеристиках. На рис. 2, б представлен фрагмент аналогичного процесса в виде диаграммы Ганта. Мониторинг процессов анализа заключается в автоматическом заполнении поля "Процент завершенности" рис. 2, а и в. При этом сигналов, подтверждающих выполнение подэтапов процесса, программным обеспечением не принимается. Степень выполнения процесса рассчитывается по соотношению системного времени персонального компьютера АРМ и заданных оператором временных границ процесса.

Математическая модель технологического процесса, описывающая диаграмму Ганта (рис. 2, б) и таблицу хронометража (рис. 2, а и в), представляет собой, так называемую, рекурсивную модель [1, 2]. Именно такая модель использована в рассматриваемых АРМ. Для характеристики каждой операции вводится неотрицательная переменная  $y$  — по смыслу степень выполнения операции. В проекции на ось времени  $j$ -й процесс может быть записан с помощью рекурсивной модели ( $a$  — задержка перед началом выполнения операции,  $n$  — количество операций в ТП):

$$\begin{cases} y_1^j = a_1^j + T_1^j \\ y_2^j = y_1^j + a_2^j + T_2^j \\ \dots \\ y_n^j = y_{n-1}^j + a_n^j + T_n^j \end{cases} \quad (1)$$

Общий вид системы (1) для многомерного процесса может быть представлен с помощью следующей системы ( $r$  — количество подпроцессов):

$$\begin{cases} y_i^j = y_{i-1}^j + a_i^j + T_i^j, \\ (a_i^j - y_i^k)(a_i^k - y_i^j) \leq 0, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, r; k \neq j, \\ a_i^j \geq 0, \\ y_0^j \equiv 0. \end{cases} \quad (2)$$

Неравенство-произведение введено в систему (2) для обеспечения корректности сложного процесса, когда одна операция не может выполняться одновременно в разных подпроцессах.

### ***Анализ реализации функций автоматизации планирования, мониторинга и корректировки процессов анализа ТМИ***

Критический подход к практической реализации рассматриваемых функций позволяет сделать следующие выводы:

1. Отсутствует единое методическое обеспечение автоматической генерации технологических процессов из карточек хронометража, данная операция выполняется оператором "вручную".
2. Отсутствует инструмент ввода условий начала или окончания операций.
3. Присутствует чрезмерная громоздкость отображения сложных, вложенных и иерархических процессов.
4. Отсутствует методическое обеспечение автоматической перестройки используемого представления процесса при изменении приоритетности, условий или характеристик операций.
5. Отсутствует единое методическое обеспечение по верификации процесса.
6. Отсутствует возможность контроля событийных (невременных) процессов.
7. Отсутствует возможность планирования технологического процесса с учетом результатов обработки и анализа телеизмерений.

Представляется, что причиной указанных недостатков является именно используемая модель технологического процесса анализа ТМИ: рекурсивная модель. Для устранения недостатков была разработана новая модель [1] и соответствующие алгоритмы синтеза, отслеживания (контроля) и корректировки модели. Для доказательства максимальной общности и одновременно корректной адаптации для существующих типов взаимосвязей операций в предметной области технологических процессов информационного обеспечения испытаний и применения КСр необходимо провести ее апробацию.

### **Апробация подхода к моделированию сложных технологических процессов**

#### ***Технологический процесс обработки и анализа ТМИ***

Кратко рассмотрим организацию технологического процесса обработки и анализа информации РН. В табл. 2 приведены характеристики технологического графика обработки и анализа ТМИ по результатам подготовки и пуска РН Союз-2.

Таблица 2

**Технологический график обработки и анализа ТМИ**

Наименование этапа	Временной интервал выполнения	Фактический результат обработки и анализа ТМИ на этапе
Подготовка специального программного обеспечения	За 2—3 сут до пуска	Формуляры отображения ТМИ во время ведения репортажа
Полет изделия и оперативная обработка ТМИ в режиме реального времени	Примерно 1000 с полета РН	Результаты оперативной регистрации ТМИ
Экспресс-обработка и экспресс-анализ ТМИ	2—3 ч после пуска	Уточненные по задержанному потоку значения телеметрируемых параметров
Послеполетная обработка ТМИ	3 сут после пуска	Максимально достоверная совокупность результатов телеизмерений, сформированная после сбора информации со всех измерительных пунктов
Послеполетный анализ ТМИ	30 сут после пуска	Оперативный отчет по результатам подготовки к пуску и полета изделия

В зависимости от этапа подготовки и пуска РН обработка ТМИ включает декоммутацию и дешифровку:

- полного объема ТМИ при подготовке на технической и стартовой позициях;
- минимального объема наиболее важной ТМИ (1 %) в репортажном режиме при проведении пусковых операций и на участке выведения (оперативная обработка);
- ограниченного объема ТМИ (70 %) непосредственно после пуска (этап экспресс-обработки);
- полного объема зарегистрированной ТМИ (100 %) после сбора всех результатов телеизмерений (послеполетная обработка).

В результате оперативной обработки формируются потоки измерений, которые передаются на АРМ специалистов по определению технического состояния бортовых систем, где отображаются в реальном масштабе времени в виде таблиц и графиков, по которым ведется репортаж о пуске и осуществляется оперативное оценивание состояния бортовых систем РН.

При ведении репортажа функциональные параметры, как правило, отображаются на экранах мониторов в виде движущихся графиков функционирования на заданном диапазоне отображения информации (обычно 50 с). Сигнальные параметры отображаются в виде табличных формуляров времен срабатывания сигнальных параметров, содержащих имя параметра, его индекс, время изменения состояния параметра и редакцию состояния в соответствии с эксплуатационно-технической документацией.

Для проведения экспресс-анализа проводится экспресс-обработка телеметрической информации основного и задержанного потоков. Обработка информации задержанного потока производится для уточнения времен срабатывания сигнальных параметров. Обработка и документирование информации задержанного потока по функциональным параметрам производится по отдельным запросам в случае недостоверности информации основного потока.

Результаты автоматизированной экспресс-обработки представляются в виде графиков материалов обработки ТМИ в целях обеспечения экспресс-анализа. Под термином график понимается совокупность измерений параметров, объединенных принадлежностью одной системе или агрегату РН. Таким образом, графики отличаются набором телеметрируемых параметров, формируемым в зависимости от задач, стоящих перед данным оператором, по определению состояния конкретных бортовых систем.

Автоматизированная послеполетная обработка телеметрической информации проводится на средствах космодрома с использованием программного обеспечения обработки информации. Результаты автоматизированной послеполетной обработки представляются в виде графиков, состав параметров в которых расширен по сравнению с графиками, формируемыми на этапе экспресс-обработки. На данном этапе в графики включаются результаты обработки информации бортовой цифровой вычислительной машины, также результаты телеизмерений проходят дополнительную обработку в целях повышении достоверности измерений.

Послеполетная обработка телеметрической информации активного участка включает в себя следующие этапы:

- подготовка исходных технологических данных;
- регистрация телеметрической информации;
- формирование "единого" файла зарегистрированной ТМИ;

- представление результатов регистрации и обработки ТМИ в виде графиков.

Из наиболее качественных результатов телеизмерений от всех измерительных пунктов по трассе полета РН формируется так называемый "единый" (сводный, результирующий) файл (запись, носитель информации), содержащий измерения от начала подготовки к пуску до момента прекращения приема сигнала с РН.

Если при автоматизированной обработке не сформированы значения одного или нескольких параметров или значения параметров существенно отличаются от ожидаемых, то для уточнения результатов может использоваться режим ручной обработки телеметрической информации.

Целью послеполетной обработки информации является представление результатов телеметрических измерений, зарегистрированных при полете РН в виде, удобном для проведения послеполетного анализа.

Содержанием послеполетного анализа ТМИ является выполнение задач:

- оценивания летно-технических характеристик изделия;
- проведения статистического и инженерного анализа;
- подготовки отчетных материалов по результатам пуска.

### **Декомпозиция технологического процесса обработки и анализа ТМИ**

Технологический процесс обработки и анализа ТМИ является сложным процессом. Его сложность заключается в присутствии следующих аспектов:

- процесс обработки ТМИ является иерархическим процессом, что означает многоуровневую вложенность операций;
- среди операций процессов присутствуют временные и событийные, причем в некоторых случаях целесообразно преобразовывать временные процессы в событийные;
- траектория развития процесса анализа ТМИ не является предопределенной априорно;
- часть операций допускает выполнение в параллельном режиме, часть — является зависимой, что означает начало выполнения очередной операции только после окончания предыдущей.

Наличие указанных аспектов обосновывает необходимость декомпозиции технологического процесса обработки и анализа ТМИ в иерархическую структуру, которую можно представить как древовидную схему рис. 3.

Процесс обработки и анализа ТМИ может быть декомпозирован на подпроцессы девяти уровней. Если операции процесса являются зависимыми, то они соединены стрелками, а если — независимыми, т. е. допускается их выполнение в произвольной последовательности или одновременно, то операции не соединены. Вид связи между уровнями процессов также зависит от вида зависимости между операциями нижестоящего процесса. Если операции нижестоящего процесса зависимы, то связь между уровнями показана стрелками, при этом нисходящая стрелка направлена к первой операции нижестоящего процесса, а восходящая — от последней. Такая связь обозначает то, что вышестоящий процесс состоит из нижестоящих операций, начинается с началом первой нижестоящей операции и заканчивается с окончанием последней операции. Фигурными скобками показаны связи между процессами, когда вышестоящий процесс характеризуется только объемом, а не очередностью нижестоящих операций.

Процессы всех уровней, кроме первого и последнего, представлены фрагментарно, т. е. из нескольких операций процесса раскрыта на нижестоящем уровне только одна операция. Данный подход не отменяет формулируемые в заключении результаты апробации моделирования рассматриваемого процесса. Подход предпринят для уменьшения объема статьи.

*Процесс уровня 1* "Обработка и анализ ТМИ по результатам подготовки и пуска РН" является непосредственно моделируемым процессом. Это процесс верхнего уровня.

*Процесс уровня 2* состоит из 5 операций. Данные операции представляют собой этапы обработки и анализа ТМИ. Все операции процесса данного уровня являются строго последовательными, поэтому он соединен направленными стрелками.

*Процесс уровня 3* раскрывает операцию "Послеполетный анализ ТМИ". Операции уровня 3 определены по максимально общим интервалам испытания и применения РН, на которых рассчитываются ЛТХ.

*Процесс уровня 4* содержит ряд операций по вычислению ЛТХ отдельных агрегатов и систем РН. Вычисление ЛТХ может быть организовано в произвольном порядке.

Процесс расчета ЛТХ двигательных установок (ДУ) раскрыт операциями *процесса уровня 5*. Операция "Двигательные установки центрального и боковых блоков" заключается в расчете ЛТХ двигателей 1-й и 2-й ступеней. Операция "Двигательная установка 3 ступени" — расчет ЛТХ двигателя 3-й ступени. Параметры, измеряемые

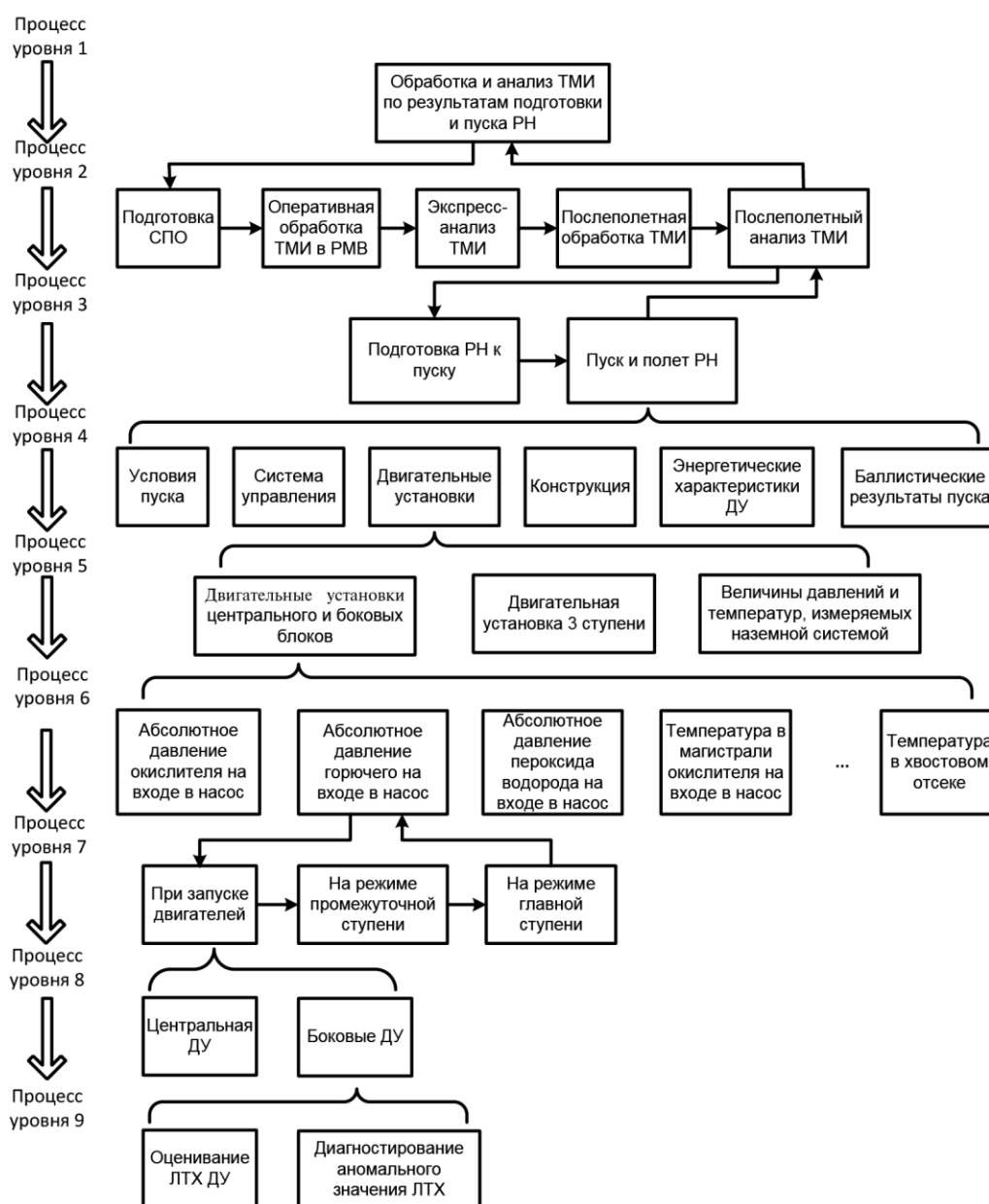


Рис. 3. Деревовидная структура декомпозиции процесса обработки и анализа ТМИ

наземным информационно-управляющим комплексом систем измерений, обрабатываются и анализируются в соответствующей операции.

Процесс уровня 6 раскрывает состав операций расчета ЛТХ двигательных установок 1-й и 2-й ступеней РН. Расчет именно ЛТХ "Абсолютное давление горючего на входе в насос" выбран в качестве примера апробации.

Процесс уровня 7 содержит зависимые операции расчета и анализа ЛТХ давления горючего на входе в соответствующий насос двигательной установки на различных этапах работы ДУ.

Апробация проводится на интервале "При запуске двигателей".

ЛТХ "Абсолютное давление горючего на входе в насос" на интервале "При запуске двигателей" рассчитывается по отличающейся методике для центрального блока РН и для боковых блоков. Такое деление показано процессом уровня 8. Операция "Боковые ДУ" процесса уровня 8 — это операция по оцениванию и анализу давления горючего перед насосом горючего в боковых блоках РН при запуске двигателей.

*Процесс уровня 9* — это совокупность операций непосредственно вычисления значения ЛТХ и его сравнения с допуском на штатное функционирование системы РН, а также диагностирование системы при аномальном значении ЛТХ. В качестве иллюстрации процесса моделирования с помощью рассматриваемого подхода рассмотрим процесс уровня 9.

### ***Синтез модели процесса анализа давления горючего на входе в насос боковых блоков РН***

В [1] было отмечено, что для синтеза модели необходимо представить информацию о моделируемом процессе в едином унифицированном виде представления — универсальные исходные данные (УИД). Такие данные должны содержать информацию о следующих характеристиках процесса:

- тип элементарных событий, используемых в качестве отсчетов для контроля степени выполнения процесса;
- управляющий бинарный параметр, определяющий разрешение начала выполнения процесса;
- количество элементарных событий, которые должны быть отсчитаны после разрешения начала выполнения процесса для непосредственного начала его выполнения — задержка начала выполнения операции;
- количество элементарных событий, определяющих длительность выполнения процесса;
- управляющий бинарный параметр, определяющий разрешение окончания выполнения процесса;
- количество элементарных событий, которые должны быть отсчитаны после разрешения окончания выполнения процесса для непосредственного его окончания — задержка окончания выполнения операции;
- управляющий бинарный параметр, определяющий приостановку выполнения процесса;
- управляющий бинарный параметр, определяющий возобновление выполнения процесса после его приостановки.

Процесс уровня 9 состоит из двух операций: "Операция оценивания ЛТХ при запуске БДУ" и "Диагностирование аномального значения ЛТХ". БДУ — боковая ДУ. Для каждой из операций необходимо сформировать УИД.

Рассмотрим операцию "Операция оценивания ЛТХ при запуске БДУ".

Элементарными событиями для отсчета степени выполнения моделируемой операции

используются факты сравнения значений ЛТХ с границами допусков на штатное поведение анализируемой системы для каждого бокового блока РН. Для параметра давления горючего на входе в насос штатным является значение в пределах от 4,05 до 4,70 кгс/см<sup>2</sup>. При этом и положительный, и отрицательный результат сравнения будет являться элементарным событием.

Управляющим бинарным параметром, разрешающим начало выполнения операции, является формирование системой управления команды "ПРК" (промежуточная команда), обозначающей промежуточную ступень тяги ДУ. Данный момент циклограммы работы ДУ принимается за момент запуска двигателей. В ТМИ такой момент циклограммы идентифицируется по моменту переключения из положения "ВЫКЛ" в положение "ВКЛ" значений сигнальных параметров ВП26..д, где индексы "бд" обозначают соответствующую боковую ступень.

Параметры задержки начала и окончания выполнения операции не используются.

Длительность операции равна 4 элементарным событиям — по количеству боковых блоков РН.

Управляющего бинарного параметра, разрешающего окончание выполнения операции не используется, вследствие того, что длительность операции определяется только окончанием анализа ЛТХ всех четырех боковых блоков РН.

Приостановок и, соответственно, возобновлений оценивания ЛТХ не предусматривается.

Рассмотрим операцию "Диагностирование аномального значения ЛТХ".

Процесс диагностирования является процессом интеллектуального поиска причин выхода значения ЛТХ за пределы допуска специалистами заводов-изготовителей, представителями промышленности. Процесс диагностирования систем ДУ бокового блока в случае выхода ЛТХ за пределы допуска не является объектом моделирования в настоящем материале. Поэтому построение полной модели такого процесса не осуществляется. Под полнотой модели понимается описание всего состава УИД.

Из всех компонентов УИД для операции диагностирования опишем только управляющий бинарный параметр, определяющий разрешение начала выполнения операции. Таким управляющим бинарным параметром является факт выхода за пределы допуска значения ЛТХ. Допуск указывается в эксплуатационно-технической документации.

Систематизируем характеристики моделей процессов всех уровней в виде табл. 3.



Универсальные исходные данные процесса обработки и анализа давления горючего на входе в насос боковых блоков РН

№ п/п и наименование уровня процесса	№ п/п и наименование операции процесса	Тип УИД							
		Вид элементарных событий	Управляющий бинарный параметр "Старт"	Длительность задержки начала выполнения операции, ед. ЭС	Длительность операции, ед. ЭС	Управляющий бинарный параметр "Стоп"	Длительность задержки окончания выполнения операции, ед. ЭС	Управляющий бинарный параметр "Приостановка"	Управляющий бинарный параметр "Продолжение"
Анализ давления горючего на входе в насос при запуске двигателей	1. Анализ давления горючего на входе в насос при запуске двигателей боковых блоков РН	Моменты ((ТМП ГДНб..д>4,05) & (ТМП ГДНб..д<4,70)) OR ((ТМП ГДНб..д<4,05) OR (ТМП ГДНб..д>4,70))	ИСТИНА (СП ВП26..д->вкл.)	0	4	ИСТИНА (1=1)	0	ЛОЖЬ (1=1)	ИСТИНА (1=1)
	2. Диагностирование причин аномального значения давления горючего на входе в насос при запуске двигателей боковых блоков РН	—	ИСТИНА ((ТМП ГДНб..д<4,05) OR (ТМП ГДНб..д>4,70))	—	—	—	—	—	—

Рассмотрим особенности используемых конструкций по типам УИД.

Элементарные события в модели используются одного типа: событийного. В операции "Анализ давления горючего на входе в насос при запуске двигателей боковых блоков РН" в качестве элементарных событий используются моменты окончания допускового контроля значений ЛТХ: как положительные ((ТМП ГДНб..д>4,05) & (ТМП ГДНб..д<4,70)), так и отрицательные ((ТМП ГДНб..д<4,05) OR (ТМП ГДНб..д>4,70)). Таким образом, рассматриваемые операции подвергаются событийно-технологическому контролю. Событийно-технологический контроль подразумевает использование в качестве счетчика степени выполнения технологической операции значимые смены состояния других операций.

Управляющие бинарные параметры "Старт", "Стоп", "Приостановка" и "Продолжение" предназначены для управления операциями процесса на различных этапах и уровнях. Форма записи управляющего параметра, используемая в модели процесса, следующая:

#### РЕЗУЛЬТАТ ПРЕДИКАТНОГО ВЫРАЖЕНИЯ (ПРЕДИКАТНОЕ ВЫРАЖЕНИЕ),

где "РЕЗУЛЬТАТ ПРЕДИКАТНОГО ВЫРАЖЕНИЯ" может принимать значения "ИСТИНА" или "ЛОЖЬ", "ПРЕДИКАТНОЕ ВЫРАЖЕНИЕ" представляет собой логическое выражение, принимающее тот или иной результат в зависимости от используемых в выражении переменных. В соответствии с принципами построения модели технологического процесса [1] управляющий бинарный параметр может принимать значения только "0" или "1", эквивалентными данным значениям являются логические константы "ЛОЖЬ" и "ИСТИНА".

Для управляющих параметров, не предусматривающих изменения своего значения, в поле "ПРЕДИКАТНОЕ ВЫРАЖЕНИЕ" записываются только константы. Затем в зависимости от требуемого значения управляющего параметра записывается требуемое значение "РЕЗУЛЬТАТ ПРЕДИКАТНОГО ВЫРАЖЕНИЯ". Таким образом, результат такого предиката неизменен.

Для управляющего параметра, предусматривающего возможность изменения своего значения, предикат должен содержать переменные. В качестве примера рассмотрим значение управляющего бинарного параметра "Старт" модели операции "Анализ давления горючего на входе в насос при запуске двигателей боковых блоков РН": "ИСТИНА (СП ВП2б..д->вкл.)". Предикатом здесь является выражение "СП ВП2б..д->вкл.", которое разбирается следующим образом: сигнальный параметр (СП) "ВП2б..д" переключился в состояние ВКЛ. Результатом предиката, при котором управляющий параметр будет равен "1", является результат "ИСТИНА". Таким образом, если указанный сигнальный параметр переключится в состояние ВКЛ, то это будет разрешающим сигналом к началу выполнения модели данной операции.

Рассмотрим способ априорно однозначного описания значения управляющего параметра. Управляющий параметр "Стоп" операции "Анализ давления горючего на входе в насос при запуске двигателей боковых блоков РН" записывается в следующем виде: "ИСТИНА (1=1)". В данном выражении предикат всегда имеет результат "ИСТИНА". Именно такое значение необходимо для присвоения управляющему параметру значения "1". Поэтому управляющий параметр "Стоп" операции всегда равен "1". Другая ситуация: управляющий параметр "Приостановка" операции примет значение "1" при условии "ЛОЖЬ (1=1)". Такой результат невозможен, поэтому управляющий параметр "Приостановка" операции никогда не примет значение "1", что обозначает, указанная операция не может быть приостановлена.

#### Общая схема модели процесса

Достоинством подхода к моделированию технологических процессов, предложенного в [1], является универсальность схемы технологической операции (ТО). Свойство универсальности схемы ТО заключается в ее адаптации к реализации условных операций, невременного контроля, вложенности и иерархичности структуры всего процесса.

По причине универсальности схемы ТО совокупность элементов за исключением входных и выходных позиций может быть заменена специальной переходом-процедурой — универсальной схемой ТО (УСТО). Схема обобщения ТО приведена на рис. 4. Переход-процедура УСТО обозначен прямоугольником с двойными линиями. В левой части приведены все входные позиции, определяющие ход ТО. В правой части приведе-

ны все выходные (индикаторные) позиции, показывающие ход ТО. Внутри перехода-процедуры приведены значения длительностей задержки начала выполнения (<ЗН>), задержки окончания выполнения (<ЗК>) и непосредственно выполнения операции (<Длит>).

Переход-процедура является удобным средством компактного отображения процессов, когда вместо громоздкого объема внутренних позиций и переходов схемы модели ТП используется только одно изображение перехода-процедуры.

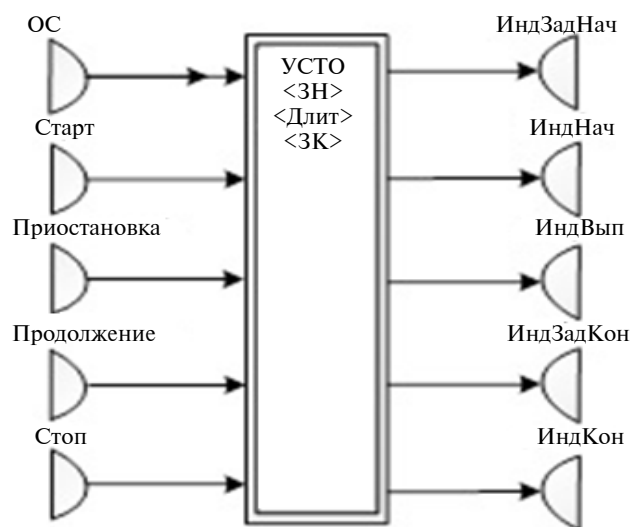


Рис. 4. Обобщенная схема УСТО

Позиции "Старт", "Стоп", "Приостановка" (приостановка выполнения ТО) и «Продолжение» (продолжение выполнения ТО) являются позициями, содержащими управляющие сигналы. 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 являются бинарными.

Позиции "ИндЗадНач", "ИндНач", "ИндВып", "ИндЗадКон" и "ИндВып" являются индикаторными и обеспечивают наблюдаемость модели ТО. Данные позиции должны использоваться для определения траектории развития ТП путем сравнения значений в данных позициях с некоторыми эталонами. Индикаторные позиции "ИндЗадНач", "ИндВып" и "ИндЗадКон" являются по содержанию счетными, так как содержат количество отсчетов событий, полученных за интервал отсчета, соответственно, задержки начала выполнения, непосредственного выполнения и задержки окончания выполнения опе-

рации. Позиции "ИндНач" и "ИндВып" являются бинарными и «сигнализируют» о фактах, соответственно, начала и окончания выполнения операции.

**Схема модели процесса анализа  
давления горючего на входе в насос  
боковых блоков РН**

На рис. 5 представлена схема модели процесса анализа давления горючего на входе в насос горючего боковых блоков РН при запуске двигателей. С помощью данной схемы рассмотрим работу указанной модели.

Входная позиция "ГТС" содержит информацию группового телеметрического сигнала (ГТС). Данная позиция содержит "раскрашенные" фишки. "Цвет" фишек, передаваемых по дуге, характеризует информационное содержание фишек и наносится над дугой в кавычках. "Цвет" фишек, содержащихся в позиции "ГТС" и передаваемых по выходной дуге из данной позиции: "Кадр ГТС". Цвет "Кадр ГТС" является иерархическим. Он включает цвета "Служебная

информация" и "ТМП", образуя, таким образом, древовидную структуру. Фишки цвета "ТМП" подразделяются на цвета в соответствии с физическим смыслом конкретного ТМП. В данной схеме используются подцвета "ТМП": цвета «ВП26..д» (сигнальный параметр, команда от системы управления РН на включение и выключение клапана ДУ боковых блоков, соответственно, "Б", "Д", "В" и "Г") и "ГДН6..д" (телеметрируемый параметр давления горючего на входе в насос горючего боковых блоков, соответственно, "Б", "Д", "В" и "Г"). Фишки, которые несут информацию только о событии (фишки в классическом смысле сетей Петри [3, 4]), называются бесцветными.

Переход "Деком. ГТС" выполняет функцию декоммутации из кадра ГТС параметров содержания, указанного на выходе перехода. Фишки на выходе данного перехода являются носителем не только факта декоммутации параметра, но и носителем значения этого параметра.

Позиции "ВП26..д" и "ГДН6..д" содержат результаты декоммутации в виде фишек соответствующих цветов.

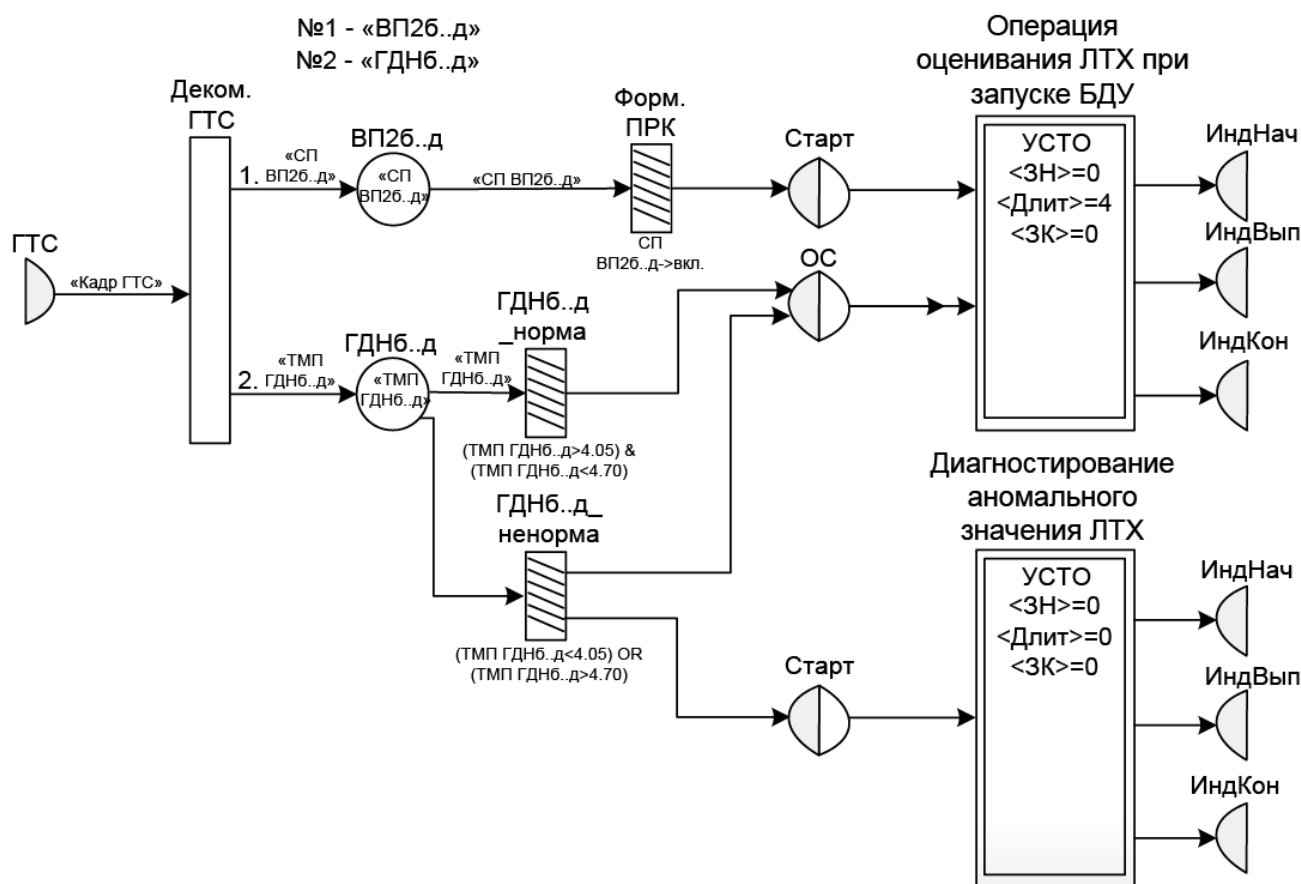


Рис. 5. Схема модели процесса анализа давления горючего на входе в насос боковых блоков РН

Переход "Форм. ПРК" является переходом, реализующим предикатное выражение, представленное под переходом: СП ВП2б..д->вкл. Выражение означает, фишка на выходе перехода будет сформирована при переключении сигнального параметра ВП2б..д из положения «ВЫКЛ» в положение "ВКЛ". Сформированная таким образом фишка будет являться управляющим сигналом "Старт", разрешающим начало выполнения операции оценивания ЛТХ при запуске БДУ.

Предикатные переходы "ГДНб..д\_норма" и "ГДНб..д\_ненорма" формируют фишки на своем выходе в зависимости от результата проверки соответствующего предикатного выражения, представленного под переходами. Результаты выполнения предикатных выражений являются элементарными событиями для операции оценивания ЛТХ при запуске БДУ. Отрицательный результат допускового контроля — это формирование фишки на выходе перехода "ГДНб..д\_ненорма" при  $\text{ГДНб..д} < 4,05 \text{ кгс/см}^2$  или  $\text{ГДНб..д} > 4,70 \text{ кгс/см}^2$ .

Универсальные схемы технологической операции (УСТО) "Операция оценивания ЛТХ при запуске БДУ" и "Диагностирование аномального значения ЛТХ" запускаются соответствующими позициями "Старт". Первая УСТО имеет установленную длительность и будет закончена по получению соответствующего количества отсчетов элементарных событий. Внутри УСТО нанесены длительности задержки начала выполнения операции, непосредственного выполнения и задержки окончания выполнения операции. На схеме не приведены входные и выходные позиции УСТО, не используемые в процессе данного уровня.

Индикаторные выходные позиции УСТО "ИндНач", "ИндКон" и "ИндВып" дают возможность получить по индикаторным фишкам информацию о фактах, соответственно, начала и окончания выполнения операции, а также о текущей длительности выполнения операции.

### **Общий подход к использованию модели процесса анализа ТМИ РН**

Решение задачи контроля состояния любой технической системы сопряжено с сопоставлением наблюдаемого состояния системы с ожидаемым или прогнозируемым. Наблюдаемое состояние — совокупность наблюдаемых признаков, подлежащих измерению и идентификации, количественных или качественных, но предусматривающих многозначность представления

(не менее двух значений). Приведенным требованиям в полной мере соответствуют индикаторные позиции УСТО. Поэтому совокупность значений именно таких позиций следует использовать для решения задачи определения текущего состояния схемы модели процесса, а значит, и состояния системы. Совокупность количества фишек в индикаторных позициях УСТО называется разметкой индикаторных позиций.

Для решения задачи контроля необходимо создать эталон поведения модели. В общем случае данный эталон должен представлять собой набор продукционных правил. Левая часть таких правил (посылка) содержит интервал или точное значение количества полученных отсчетов событий. Правая часть (или следствие) должна являться новой разметкой всех или части индикаторных позиций схемы модели.

По результатам контроля текущего состояния схемы модели (разметки индикаторных позиций) принимается решение об адекватности используемой модели реальному технологическому процессу.

Анализ ТМИ по результатам подготовки, пуска и полета РН является сложным технологическим процессом с рассмотренными выше аспектами сложности. Контроль такого процесса — важнейшая задача, решаемая в целях:

- верификации процедуры анализа ТМИ (получение результата с достаточной степенью уверенности в принимаемом решении);
- оптимизации привлекаемых ресурсов;
- оперативной корректировки процесса анализа ТМИ при изменении входной (измерительной) информации.

### **Заключение**

Представлена на основе модифицированных сетей Петри апробация подхода к моделированию технологических процессов, предусматривающих возможность условных зависимостей, иерархичности и событийных этапов в процессе. Положительной особенностью используемого подхода является его адаптация к моделированию невременных процессов, траектория развития которых определяется значениями телеметрируемых параметров.

Созданная модель процесса анализа ТМИ РН может быть использована по нескольким направлениям:

- Для верификации существующих алгоритмов анализа ТМИ РН в зависимости от вариации значений результатов телеизмерений и объектов измерений.

- Позволяет организовать трудно формализуемый процесс анализа ТМИ в оптимизационной постановке с вытекающими возможностями планирования процесса по различным критериям эффективности.
- Является высокоэффективным средством получения информации о текущем состоянии

важнейшего этапа жизненного цикла РН, что необходимо для формирования единой системы поддержки жизненного цикла [5] такой сложной технической системы, как ракетно-космическая техника.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шмелев В. В. Модели технологических процессов функционирования космических средств // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 4. С. 78—94.
2. Лескин А. А., Мальцев П. А., Спиридов А. М. Сети Петри в моделировании и управлении. — Л.: Наука, 1989. — 133 с.
3. Шмелев В. В., Самойлов Е. Б., Нездоровин Н. В. Распространение свойств сети Петри на вычислительную модель анализа результатов телеизмерений // Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 6. С. 89—90.
4. Котов В. Е. Сети Петри // Издательство Наука. 1984. — 160 с.
5. Шмелев В. В., Охтилев М. Ю. PLM-системы и их внедрение в информационное обеспечение автоматизированной системы управления подготовки и пуска ракеты космического назначения // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 4. С. 66—77.

## MODELING POST-FLIGHT ANALYSIS OF TELEMETRY DATA ON THE PREPARATION, LAUNCHING AND FLIGHT OF A ROCKET, SOYUZ-2

V. V. Shmelev, Yu. S. Manuylov

Military Space Academy named A. F. Mozhajskij, St.-Petersburg, Russia

A. V. Evenko

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*In the article the approbation of approach to the modeling of complex technological processes with the use of modified Petri nets. The proposed approach can be used to create information technologies automated control of the processing and analysis of measurement information on complex technical objects.*

**Keywords:** modeling of technological processes, Petri nets, telemetric information, the carrier rocket Soyuz-2.

**Bibliography** — 5 references.

*Received November 15, 2015*

\* \* \*