

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Докладывает
докторант академии
к.т.н. Шмелев Валентин Валерьевич

**Кафедра технологий и средств автоматизации обработки и анализа
информации космических средств**

Основные определения

ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий.

Технология – совокупность методов, процессов и материалов, используемых в какой-либо области деятельности.

Технологический процесс (ТП) – совокупность операций, выполнение которых в установленной последовательности преследует определенную цель. ТП содержит действия по изменению или определению состояния объекта воздействия.

Технологическая операция (ТО) – законченная составляющая ТП, направленная на достижение конкретной, частной цели посредством управляемого преобразования продуктов операции. ТО, как правило, выполняется одним исполнителем на одном рабочем месте.

Технологический график (ТГ) – графическое отображение ТП, содержащее необходимые сведения для выполнения процесса. Варианты исполнения: сетевой график, технологическая карта, диаграмма Ганта, таблица хронометража.

Мониторинг ТП – совокупность процедур и процессов, позволяющая по результатам измерений заданных параметров по заданному алгоритму:

- получить информацию о текущем состоянии ТП и виде технического состояния объекта ТП,
- провести прогноз опасностей и рисков, связанных с развитием ТП,
- сформировать требуемые воздействия на элементы управления, необходимые для реализации установленных предупреждающих мер.

ТМИ по результатам подготовки и пуска РН 14А14

(ГОСТ РО 1410-002-2010. Ракетно-космическая техника. Система информации о техническом состоянии и надежности космических комплексов и входящих в их состав изделий)



Анализ текущего состояния методического обеспечения решения задач мониторинга функционирования космических средств

Состав системы комплексного анализа результатов применения (СКАРП) космических средств

Система комплексного анализа результатов применения космических средств

Система
информационного
обеспечения
9 АРМ

Система анализа ЛТХ
изделий РКТ
9 АРМ

Система комплексной
оценки результатов
испытаний изделий РКТ
5 АРМ

Система контроля
качества работы
телеметрических средств
4 АРМ

Система специального
обеспечения анализа
результатов пусков
2 АРМ

Система баллистико-
навигационного
обеспечения
11 АРМ

Система совместной
обработки траекторных
измерений и контроля
качества работы
траекторных средств
3 АРМ

Функции АРМ, связанные с мониторингом процессов функционирования систем РН и обработки и анализа ТМИ

№ п/п	Система СКАРП	Название АРМ системы СКАРП	Выполняемые функции
1	СКОРИ	АРМ координации, контроля и комплексной оценки испытаний	<ul style="list-style-type: none"> разработка технологических планов (план-графиков) выполнения работ в различных формах; контроль сроков выполнения мероприятий.
7	СИО	АРМ управления и контроля НИИР	<ul style="list-style-type: none"> планирование и контроль выполнения задач СКАРП; мониторинг процесса подготовки данных для отчета по результатам выполнения опытно-испытательных работ (ОИР).
8		АПК начальника боевого расчета информационно-аналитического обеспечения испытаний	<ul style="list-style-type: none"> планирование и контроль выполнения задач СКАРП; мониторинг процесса подготовки данных для отчета по результатам выполнения ОИР.
9		АРМ подготовки исходных данных и отображения информации на наблюдательном пункте космодрома	<ul style="list-style-type: none"> визуализация прохождения команд и докладов в период подготовки к пуску; отображение циклограммы пуска и полета изделий ракетно-космической техники на активном участке траектории.
23	САЛТХ	АРМ руководителя работ анализа ЛТХ РН, БР и МБР	<ul style="list-style-type: none"> планирование задач анализа ЛТХ; управление процессами анализа ЛТХ изделий РКТ; контроль и протоколирование процесса анализа ЛТХ.
24		АРМ анализатора ЛТХ приборов электроавтоматики и источников питания образцов РКТ	<ul style="list-style-type: none"> прием и отображение циклограммы предстартовой подготовки и полета.
25		АРМ анализа ЛТХ автомата стабилизации и комплекса командных приборов образца РКТ	<ul style="list-style-type: none"> прием и отображение циклограммы предстартовой подготовки и полета.
27		АРМ анализа ЛТХ СУРТ, СОБ (СОБИС), РК, АВ образцов РКТ	<ul style="list-style-type: none"> прием и отображение циклограммы предстартовой подготовки и полета.

Способ реализации функций мониторинга в АРМ № 9, 24, 25 и 27

Форма отображения циклограммы предстартовой подготовки и полета РН

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
НРос	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

Функции:

- «Отображение циклограммы пуска и полета изделий ракетно-космической техники на активном участке траектории»;
- «Прием и отображение циклограммы предстартовой подготовки и полета».

Добавить строку

Удалить строку

Способ реализации функций мониторинга

Функции:

в АРМ №1, 7, 8 и 23

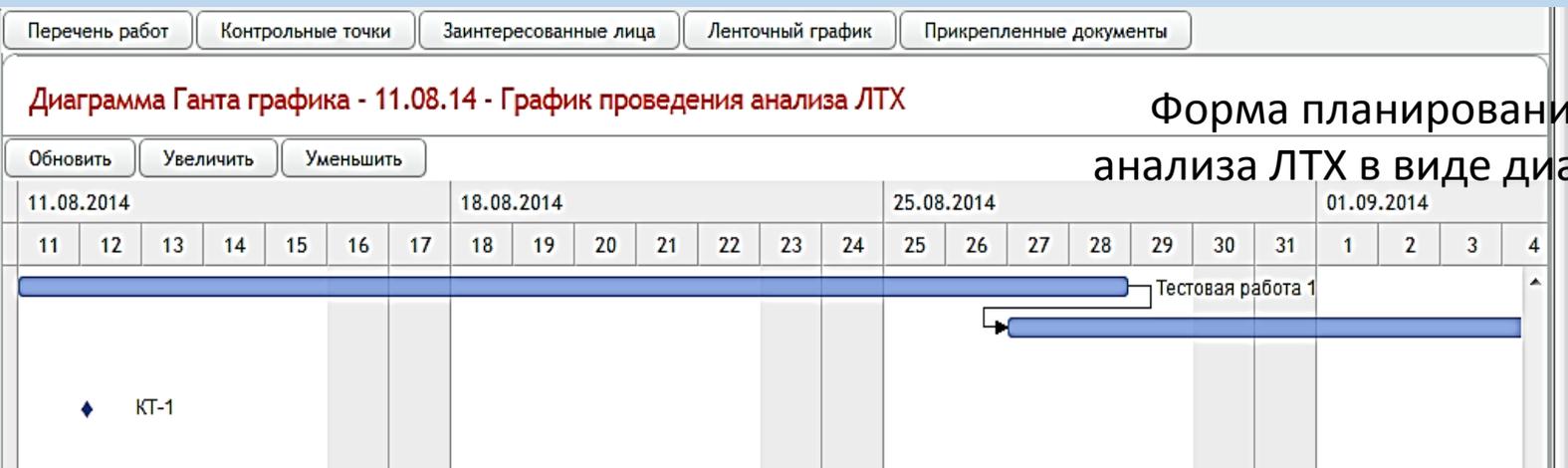
- «Планирование задач анализа ЛТХ»,
- «Планирование и контроль выполнения задач СКАРП»,
- «Мониторинг подготовки данных для отчета по результатам выполнения ОИР»,
- «Разработка технологических планов (план-графиков) выполнения работ в различных формах»,
- «Контроль сроков выполнения мероприятий».

Перечень работ Контрольные точки Заинтересованные лица Ленточный график Прикрепленные документы

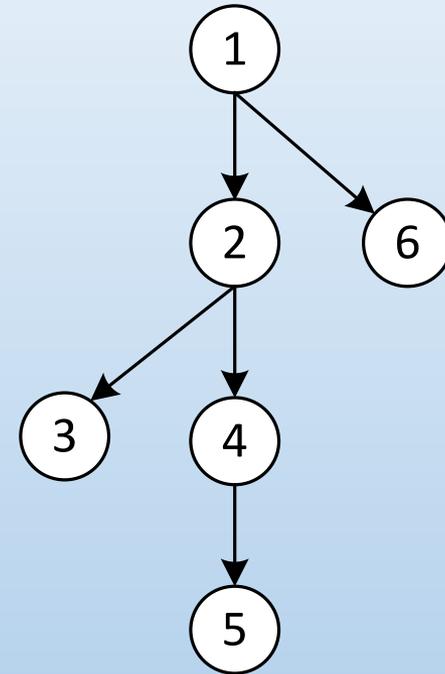
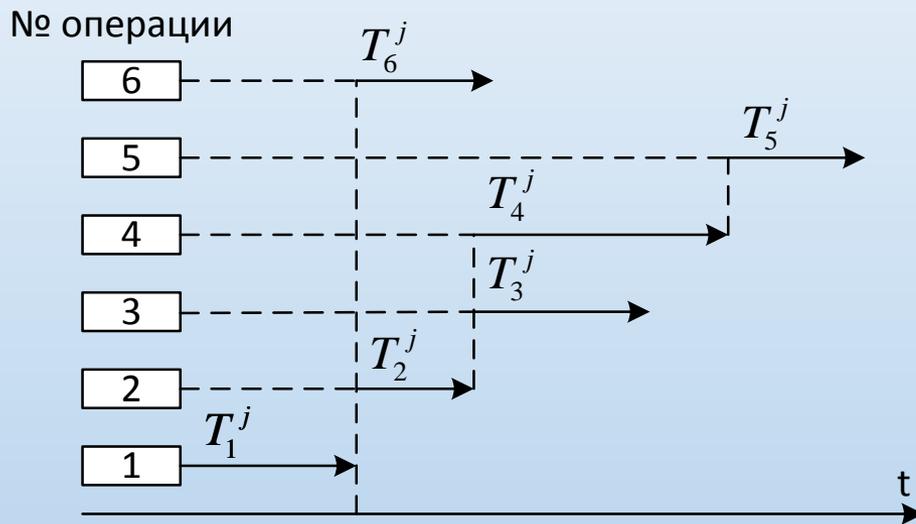
Перечень работ графика - 11.08.14 - График проведения анализа ЛТХ Форма планирования процессов анализа ЛТХ в виде таблицы хронометража

Обновить Добавить Удалить Изменить Открыть

Наименование	Начало	Продолжительность, ч.	Окончание	Процент завершённости	Входит в критический путь
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"/>



Используемая в АРМ модель ТП – рекурсивная модель, реализуемая в виде диаграммы Ганта (ДГ)



1...6 – операции ТП, номер операции;

T_i^j – длительности операции, i – номер операции,
 j – номер ТП.

Совокупность векторов T на плоскости (t, i) для фиксированного j -го ТП образует диаграмму Ганта.

Работа СПО синтеза, визуализации и контроля ТП основана на выполнении системы:

$$y_i^j(k+1) = \begin{cases} 0, 0 \leq k < k_{i_{нач}}^j \\ y_i^j(k) + \omega_i^j, k_{i_{нач}}^j \leq k \leq k_{i_{кон}}^j, i = \overline{1, n_i^j}, j = \overline{1, r} \\ n_i^j \omega_i^j, k_{i_{кон}}^j < k \end{cases} \quad (1)$$

Синтез ТП заключается в построении ДГ по данным:

$k_{i_{нач}}^j$ - момент начала i -ой операции j -го ТП.

$k_{i_{кон}}^j$ - момент окончания i -ой операции j -го ТП.

ω_i^j - интенсивность выполнения i -ой операции j -го ТП.

n_i^j - длительность i -ой операции j -го ТП.

Функционирование СПО основано на **отработке** получаемых k -ых «событий». Под **отработкой** понимается соответствующее номеру полученного события изменение визуального отображения ТП в виде ДГ.

Особенности мониторинга ТП:

- жесткие требования к оперативности получения результатов;
- высокие требования к достоверности результатов;
- разнообразие типов информации, используемой в информационном обеспечении;
- разнообразие задач и, следовательно ТП, решаемых при испытаниях и применении КСр;
- разнообразие программно-аппаратных платформ потребителей результатов;
- малые сроки постановки на информационное обеспечение новых объектов мониторинга;
- невысокие требования к программистской квалификации персонала;
- различные виды зависимостей между операциями;
- структурная иерархичность процессов;
- большая размерность процессов;
- различная природа аргументов развития процессов;
- критериальная неопределённость управления ТП.

Недостатки теоретической основы:

- отсутствует системный подход к моделированию ТП, требующий полного охвата жизненного цикла КСр;
- недостаточный учет особенностей предметной области ТП;
- громоздкость или сложность программно-алгоритмической реализации;
- работа с «состояниями», а не «переходами» ТП;
- ориентированность на процедуры в ТП, а не данные о ТП.

↓

Модельно-алгоритмические проблемы

↓

Технико-технологические проблемы

↓

Организационные проблемы

Недостатки современного СПО мониторинга ТП:

- отсутствует единое методическое обеспечение автоматической генерации моделей ТП даже из таблиц хронометража;
- сложность отслеживания и контроля невременных (событийных) процессов, обладающих свойством нерегулярности;
- преобразование событийного процесса в регулярный приводит к возрастанию вычислительной ресурсоемкости процессов контроля;
- неудовлетворительно моделируются условные операции;
- чрезмерная громоздкость моделирования сложных, вложенных ТП;
- непригодность для использования внешней информации (телеметрической);
- отсутствует методическое обеспечение автоматической перестройки технологических графиков при изменении приоритетности, условий или характеристик операций;
- отсутствует единое методическое обеспечение по верификации ТП.

↓

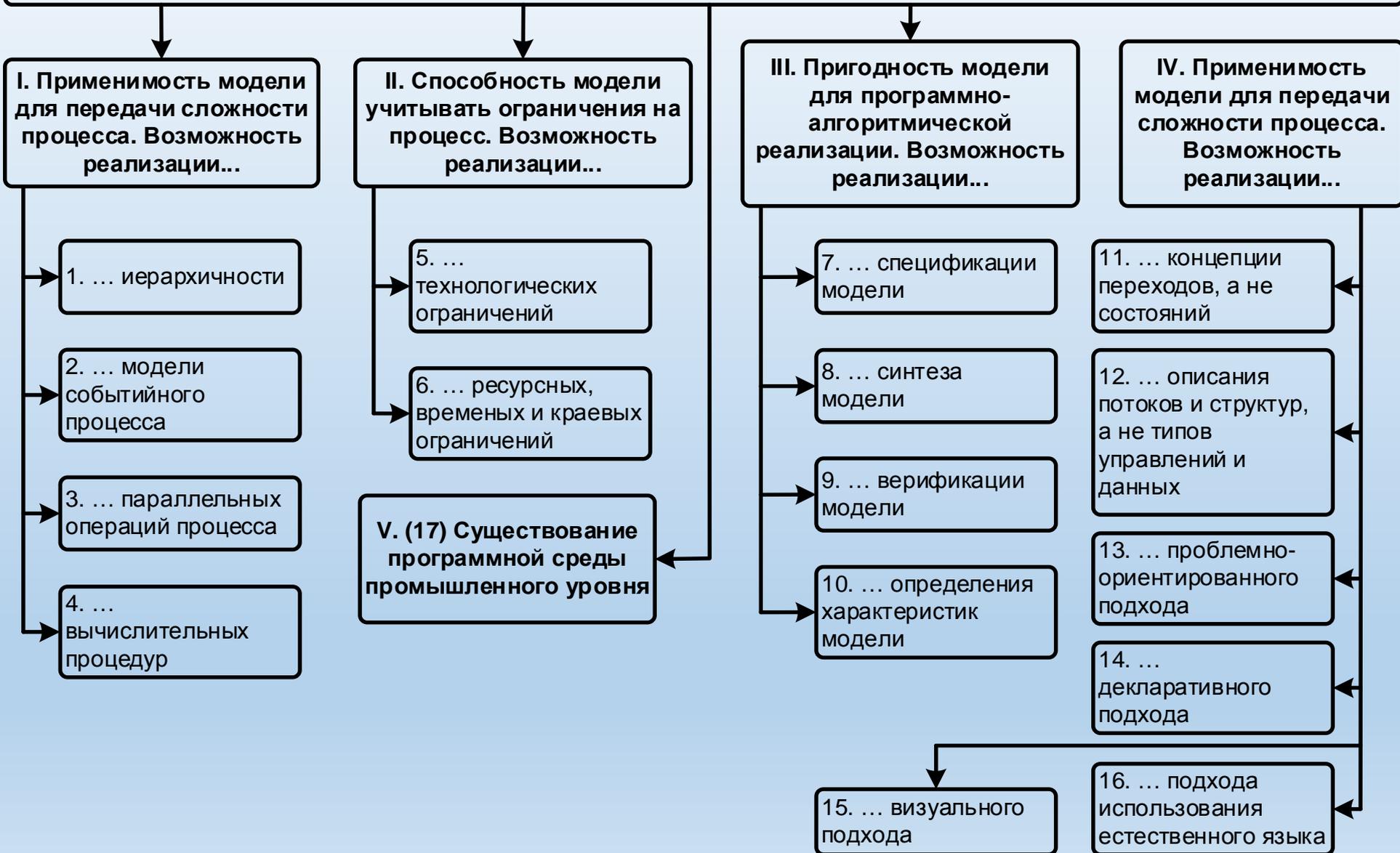
Необходимость разработки нового научно-методического аппарата решения задач мониторинга технологических процессов испытаний и применения космических средств

Сравнительный анализ подходов к моделированию технологических процессов

Классификация основных подходов к моделированию ТО



Показатели сравнения подходов к моделированию процессов



Сравнение основных подходов к моделированию ТО

15

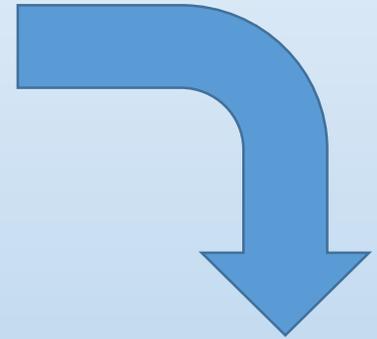
Представители подходов к моделированию процессов в предметной области	Группы показателей, критерии сравнения																	Σ	
	I				II		III				IV					V			
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.		
Простая знаковая модель																			
Диаграмма Ганта на основе рекурсивной модели	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	10	
Аналитическая модель																			
Уравнения непрерывной системной динамики	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	9	
Логико-алгебраическая модель (ЛА)																			
Автоматная модель	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	6	
Триадная модель	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	14	
Дескриптивная модель																			
Теоретико-множественная модель процесса	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	7	
Онтологическая модель процесса	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	8	
Логико-лингвистическая модель																			
Модель на основе формальных систем	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	11	
Комплексная модель (К)																			
Модель на основе классической сети Петри	+	+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	11	
Модель на основе ВРС-сетей	-	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	10	
Модель на основе G-сетей	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	13	
Симбиоз ЛА, К и логической моделей																			
Структурно-логический подход	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	15

Структурно-логический подход к мониторингу технологических процессов функционирования ракетно-космической техники

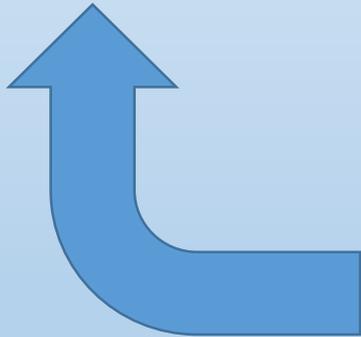
Структурно-логический подход

заключается в представлении ТП с помощью сетевой структуры, в которой

Структура технологического процесса представляется мультиагентным комплексом операций на основе совокупности универсальных схем и логико-динамических компонент.



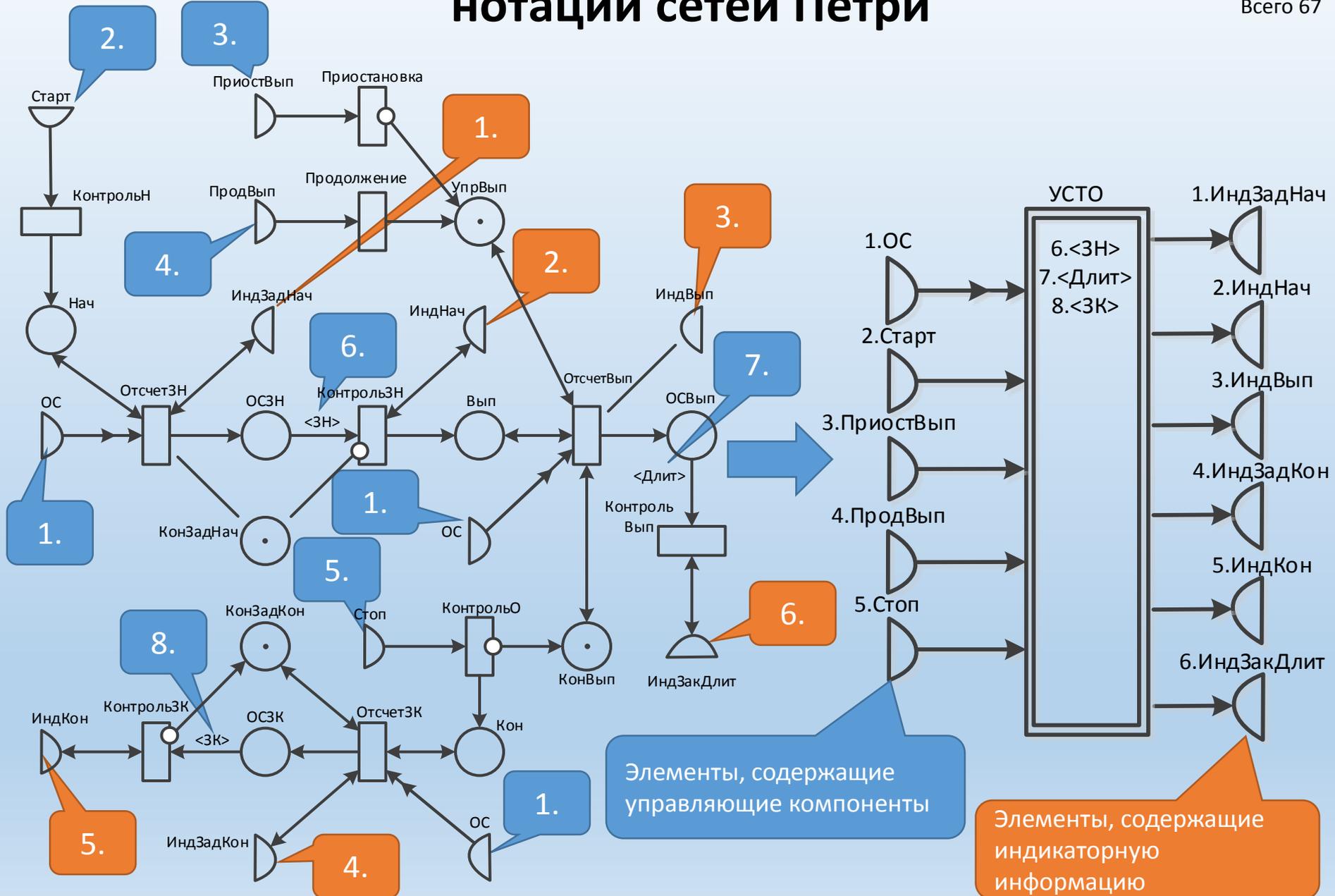
Логика технологического процесса реализуется отношениями между универсальными схемами и системой ограничений для логико-динамических компонент.



$$S = \langle P, T, F, B, H^+, H^-, M \rangle$$

- $P = \{P_{\text{вн}}, P_{\text{ин}}, P_{\text{оут}}\} = \{p_i \mid i \in I_P\}$ – конечное непустое множество позиций сети Петри S , I_P – множество номеров позиций сети, $P_{\text{вн}}, P_{\text{ин}}, P_{\text{оут}}$ – множества, соответственно, внутренних, входных и выходных позиций сети;
- $T = \{t_j \mid j \in I_T\}$ – конечное непустое множество переходов сети Петри S , I_T – множество номеров переходов сети;
- $F : P \times T \rightarrow N$ – входная функция инцидентности, описывающая кратность входной дуги от позиции p_i к переходу t_j сети 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 ;
- $B : P \times T \rightarrow Nb$ – входная функция инцидентности, описывающая сбрасывающую дугу от позиции p_i к переходу t_j сети S и ставящая в соответствие каждой паре $\langle p_i, t_j \rangle$, $i \in I_P$, $j \in I_T$ элемент бинарного множества $Nb = \{0, 1\}$;
- $H^+ : T \times P \rightarrow N$ – выходная функция инцидентности, описывающая кратность выходной «классической» дуги от перехода t_j в позицию p_i сети 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 ;
- $H^- : T \times P \rightarrow N$ – 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 ;
- $M : P \rightarrow N$ – функция разметки, которая каждому элементу $p_i \in P$ ставит в соответствие элемент множества целых неотрицательных чисел N .

Представление модели ТО в графической нотации сетей Петри



Математическая модель ТО

$$P = \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{in}} = \left\{ \text{Нач, ОСЗН, КонЗадНач, Вып, УпрВып,} \right. \\ \left. \text{ОСВып, КонВып, Кон, ОСЗК, КонЗадКон} \right\}, \\ P_{\text{out}} = \left\{ \text{ИндЗадНач, ИндНач, ИндВып, ИндЗакДлит,} \right. \\ \left. \text{ИндЗакКон, ИндКон} \right\} \end{array} \right\}$$

$$T = \left\{ \begin{array}{l} \text{КонтрольН, ОтсчетЗН, КонтрольЗН, Всего} \\ \text{ОтсчетВып, Приостановка, Продолжение,} \\ \text{КонтрольВып, КонтрольО, ОтсчетЗК,} \\ \text{КонтрольЗК} \end{array} \right\}^{67}$$

$$F < \text{Старт, КонтрольН} > = 1,$$

$$F < \{ \text{Нач, ИндЗадНач, КонЗадНач} \}, \text{ОтсчетЗН} > = 1,$$

$$F < \text{ОСЗН, КонтрольЗН} > = < \text{ЗН} > ,$$

$$F < \text{ИндНач, КонтрольЗН} > = 1,$$

$$F < \{ \text{Вып, УпрВып, индВып, КонВып} \}, \text{ОтсчетВып} > = 1,$$

$$F < \text{ПриостВып, Приостановка} > = 1,$$

$$F < \text{ПродВып, Продолжение} > = 1,$$

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

$$F < \text{ИндЗакДлит, КонтрольВып} > = 1,$$

$$F < \text{Стоп, КонтрольО} > = 1,$$

$$F < \{ \text{Кон, ИндЗадКон, КонЗадКон} \}, \text{ОтсчетЗК} > = 1,$$

$$F < \text{ОСЗК, КонтрольЗК} > = < \text{ЗК} > ,$$

$$F < \text{ИндКон, КонтрольЗК} > = 1;$$

$$H^- < \text{КонтрольЗН, КонЗадНач} > = 1,$$

$$H^- < \text{Приостановка, УпрВып} > = 1,$$

$$H^- < \text{КонтрольО, КонВып} > = 1,$$

$$H^- < \text{КонтрольЗК, КонЗадКон} > = 1;$$

$$B < \text{ОС}, \{ \text{ОтсчетЗН, ОтсчетВып, ОтсчетЗК} \} > = 1$$

$$H^+ < \text{КонтрольН, Нач} > = 1,$$

$$H^+ < \text{ОтсчетЗН}, \left\{ \begin{array}{l} \text{Нач, ИндЗадНач,} \\ \text{ОСЗН, КонЗадНач} \end{array} \right\} > = 1,$$

$$H^+ < \text{КонтрольЗН}, \{ \text{ИндНач, Вып} \} > = 1,$$

$$H^+ < \text{ОтсчетВып}, \left\{ \begin{array}{l} \text{Вып, УпрВып, ИндВып,} \\ \text{ОСВып, КонВып} \end{array} \right\} > = 1,$$

$$H^+ < \text{Продолжение, УпрВып} > = 1,$$

$$H^+ < \text{КонтрольВып, ИндЗакДлит} > = 1,$$

$$H^+ < \text{КонтрольО, Кон} > = 1,$$

$$H^+ < \text{ОтсчетЗК}, \left\{ \begin{array}{l} \text{ОСЗК, КонЗадКон,} \\ \text{Кон, ИндЗадКон} \end{array} \right\} > = 1,$$

$$H^+ < \text{КонтрольЗК, ИндКон} > = 1;$$

$$M(\text{УпрВып}) = M(\text{КонЗадНач}) = M(\text{КонВып}) = M(\text{КонЗадКон}) = 1$$

$$\mathfrak{R} = \langle S, \mathfrak{T}, Q \rangle$$

- $S = \{S_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}\}$ – 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;
- $\mathfrak{T} = \{\mathfrak{T}_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}\}$ – множество функций инцидентности технологического процесса \mathfrak{R} , описывающее логику процесса, \mathfrak{T}_k – функция инцидентности операции S_k , где $\mathfrak{T}_k : P_{in}^{(l,k)} \times P_{out}^{(k,m)} \rightarrow N_{\mathfrak{T}}$ описывает «склеивание» выходных позиций операции S_l и входных позиций операции S_k , а также выходных позиций операции S_k и входных позиций операции $S_m, m, l \in I_S$. Перечень «склеиваемых» входных позиций из множества $P_{in}^{(l,k)} = \{\text{«ОС»}, \text{«Старт»}, \text{«Стоп»}, \text{«Приостановка»}, \text{«Продолжение»}\}$ и выходных из множества $P_{out}^{(k,m)} = \{\text{«ИндЗадНач»}, \text{«ИндНач»}, \text{«ИндВып»}, \text{«ИндЗадКон»}, \text{«ИндКон»}\}$ определяет логику движения моделируемого технологического процесса. С учетом ограниченности количества входных и выходных позиций (мощности множеств $P_{in}^{(l,k)}$ и $P_{out}^{(k,m)}$) можно утверждать, что $N_{\mathfrak{T}}$ является множеством натуральных чисел, ограниченным сверху числом 5 включительно;
- $Q = \{Q_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)}\}$ – множество ограничений технологического процесса \mathfrak{R} , Q_k – множество отношений, ограничивающий выбор альтернативы развития k -ой операции (например, запуска операции), естественно, что данное множество может быть и пустое при отсутствии альтернатив, в свою очередь ограничение Q_k операции S_k также является множеством $Q_k = \{q_c^{(k)} \mid c = \overline{1, \text{card}(Q)}\}$, где $q_c^{(k)}$ – c -й вид ограничения операции S_k , c – порядковый номер ограничения, $\text{card}(Q)$ – количество накладываемых ограничений.

Ограничение технологической операции S_k представляет собой кортеж:

$$q_c^{(k)}(\cdot) = \langle ZP_{(\cdot)}, PT_{(\cdot)}, ZF_{(\cdot)}, H, ZM_{(\cdot)} \rangle, \quad (1)$$

где:

- $ZP_{(\cdot)} = \{zp_{(\cdot)i} \mid i \in I_{ZP_{(\cdot)}}\}$ – конечное непустое множество z-позиций схемы ограничения $q_c^{(k)}(\cdot)$, (\cdot) – аргумент предиката или свойство процесса, подлежащее ограничению, $I_{ZP_{(\cdot)}}$ – множество номеров позиций схемы;
- $PT_{(\cdot)} = \{pt_{(\cdot)j} \mid j \in I_{PT_{(\cdot)}}\}$ – конечное непустое множество предикатных переходов схемы ограничения $q_c^{(k)}(\cdot)$, I_T – множество номеров переходов сети. При этом непосредственно выражением предиката является запись « $q_c^{(k)}(\cdot)$ »;
- $ZF_{(\cdot)} : ZP_{(\cdot)} \times PT_{(\cdot)} \rightarrow \{0,1\}$ – входная функция инцидентности, описывающая входную z-дугу от позиции $zp_{(\cdot)i}$ к предикатному переходу $pt_{(\cdot)j}$ схемы ограничения $q_c^{(k)}(\cdot)$, ставящая в соответствие каждой паре $\langle zp_{(\cdot)i}, pt_{(\cdot)j} \rangle$, $i \in I_{ZP_{(\cdot)}}$, $j \in I_{PT_{(\cdot)}}$ элемент множества $\{0,1\}$;
- $H : PT_{(\cdot)} \times P \rightarrow N$ – выходная функция инцидентности, описывающая кратность выходной «классической» дуги от предикатного перехода $pt_{(\cdot)j}$ в позицию p_i схемы операции S_k и ставящая в соответствие каждой паре $\langle pt_{(\cdot)j}, p_i \rangle$, $i \in I_P$, $j \in I_{PT_{(\cdot)}}$ элемент множества целых неотрицательных чисел N ;
- $ZM_{(\cdot)} : ZP_{(\cdot)} \rightarrow D_{(\cdot)}$ – функция разметки, которая каждой z-позиции $zp_{(\cdot)i} \mid i \in I_{ZP_{(\cdot)}}$ ставит в соответствие элемент $d_{(\cdot)}$ множества допустимых значений аргумента (\cdot) .

Задачи, решаемые при мониторинге технологического процесса

1. Задача *спецификации* – это задача точного и однозначного задания начального, конечного состояний процесса (модели процесса), а также требуемых значений показателей свойств процесса
2. Задача *синтеза* - это проблема построения, или автоматической *генерации* модели процесса по ее спецификации
3. Задача *проверки адекватности* – это задача проверки соответствия модели процесса ее спецификации, то есть проверки того, действительно ли процесс решает те задачи, которые на него возлагаются
4. Задача *верификации* – это задача поиска и устранения возможных ошибок в ходе выполнения процесса по синтезированной модели, обусловленных некорректностью (ограниченностью) спецификации.
5. Задача *мониторинга* – это основная, комплексная задача, включающая операции непрерывного наблюдения (измерения) параметров процесса, вычисления значений его характеристик, сравнения полученных значений с заданными (граничными) значениями и прогноза дальнейшего развития процесса, а также формирования при необходимости управляющих воздействий

Технологический процесс \mathfrak{R} описывается кортежем:

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

– $S = \left\{ S_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)} \right\}$ – множество операций процесса \mathfrak{R} , S_k – k -я операция,

входящая в технологический процесс \mathfrak{R} , I_S – целочисленное положительное не пустое ограниченное множество номеров операций;

– $L = \left\{ l_k \mid k = \overline{1, \text{card}(I_S)} \right\}$ – множество векторов – кортежей, обуславливающих

выполнение операции S_k технологического процесса \mathfrak{R} .

Вектор l_k является многомерным вектором – кортежем:

$$l_k = \langle Id_k, t_k, \tau_k \rangle, \text{ где:} \quad (2)$$

– $Id_k = \langle B_b^{(k)}, B_f^{(k)} \rangle$ – вектор-идентификатор операции S_k технологического

процесса \mathfrak{R} , состоящий из элементов: $B_b^{(k)}$ – булева переменная, идентифицирующая условие начала выполнения операции, $B_f^{(k)}$ – окончания;

– t_k – момент начала выполнения операции S_k ;

– τ_k – длительность операции S_k .

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

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

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

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

3. Длительность операции <Длит> задается равной переменной τ_k

$$F \langle \text{ОСВып}, \text{КонтрольВып} \rangle = \langle \text{Длит} \rangle = \tau_k,$$

$$\text{"ОСВып"} \in P_{\text{вн}}, P_{\text{вн}} \in P,$$

$$\text{"КонтрольВып"} \in T, S_k = \langle P, T, \dots \rangle$$

4. Логическое условие начала k-ой операции описывается с помощью отношения:

$$B_{\text{Pr}_b} : \Pr(B_f^{(l)}) \times \Pr(B_b^{(k)}) \rightarrow \mathfrak{S}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N;$$

$$P_{in}^{(k)} = \{ \text{ОС}, \text{Старт}, \text{Приостановка}, \text{Продолжение} \}$$

5. Логическое условие окончания k-ой операции описывается с помощью отношения:

$$B_{\text{Pr}_f} : \Pr(B_f^{(l)}) \times \Pr(B_b^{(k)}) \rightarrow \mathfrak{S}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N;$$

$$P_{in}^{(k)} = \{ \text{ОС}, \text{Стоп}, \text{Приостановка}, \text{Продолжение} \}$$

Адекватность модели технологического процесса его спецификации

Адекватность модели – это степень соответствия между созданной моделью технологического процесса и его спецификацией.

Формально адекватность модели устанавливается обратным формированием элементов кортежей (1) и (2) по содержимому элементов кортежей (3) и (4)

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

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

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

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

Тип связи ОН:

$$\mathfrak{T}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N : \left(N > 0, P_{out}^{(l)} \in \{ \text{ИндЗакДлит}^{(l)}, \text{ИндЗак}^{(l)} \}, P_{in}^{(k)} = \text{Старт} \right) \Rightarrow \Pr(B_b^{(k)}) = O(l);$$

Тип связи ОО:

$$\mathfrak{T}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N : \left(N > 0, P_{out}^{(l)} \in \{ \text{ИндЗакДлит}^{(l)}, \text{ИндЗак}^{(l)} \}, P_{in}^{(k)} = \text{Смон} \right) \Rightarrow \Pr(B_f^{(k)}) = O(l);$$

Тип связи НН: $\mathfrak{T}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N : \left(N > 0, P_{out}^{(l)} \in \text{ИндНач}^{(l)}, P_{in}^{(k)} = \text{Старт} \right) \Rightarrow \Pr(B_b^{(k)}) = H(l);$

Тип связи НО: $\mathfrak{T}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N : \left(N > 0, P_{out}^{(l)} \in \text{ИндНач}^{(l)}, P_{in}^{(k)} = \text{Смон} \right) \Rightarrow \Pr(B_f^{(k)}) = H(l).$

Отсутствие
связи:

$$\mathfrak{T}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N : \left(N = 0, \forall P_{out}^{(l)}, P_{in}^{(k)} = \text{Смон} \right) \Rightarrow \Pr(B_f^{(k)}) = \text{"По длит."}.$$

Таким образом, процесс проверки адекватности можно считать процессом, обратным синтезу модели

Интерпретация понятия верификации синтезированной модели ТП

Верификация синтезированной модели ТП – это проверка обеспечения следующих свойств:

Непротиворечивость – свойство синтезированной модели ТП, согласно которому наложенные ограничения в виде предикатных переходов обеспечивают достижимость всех состояний процесса

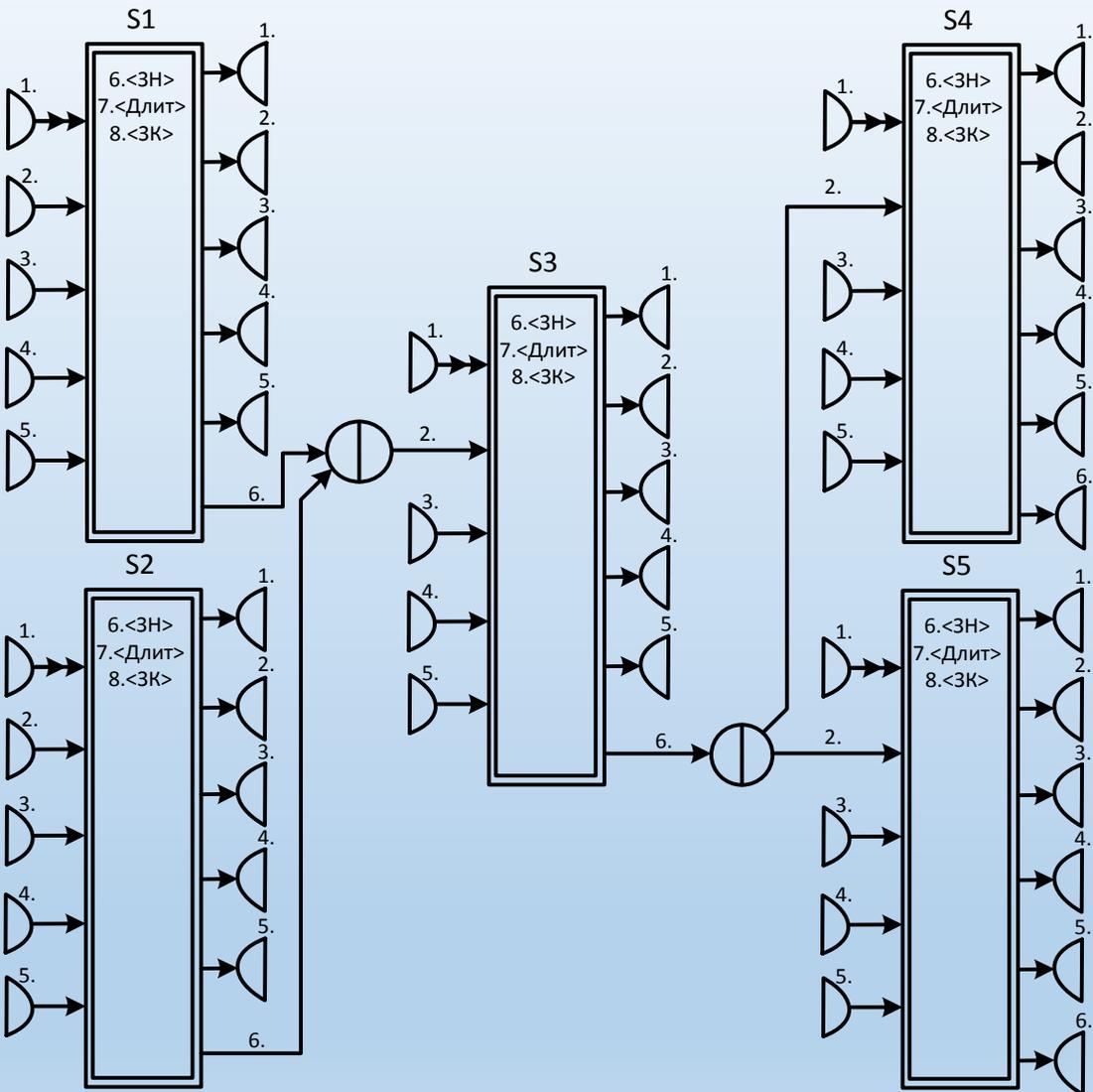
Корректность – свойство синтезированной модели ТП, согласно которому отсутствует неопределенность в смене состояний процесса

Активность (беступиковость) модели – свойство синтезированной модели ТП, согласно которому всегда возможно перевести процесс в очередное состояние с помощью соответствующей функции инцидентности

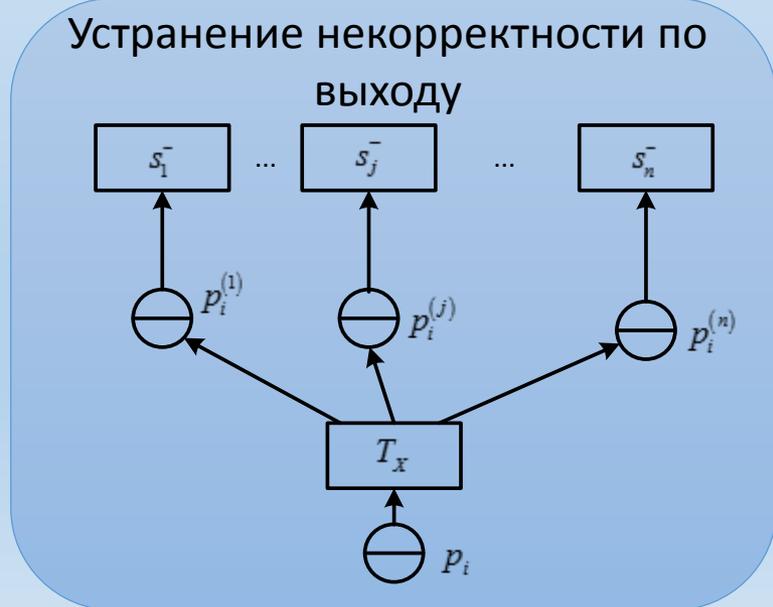
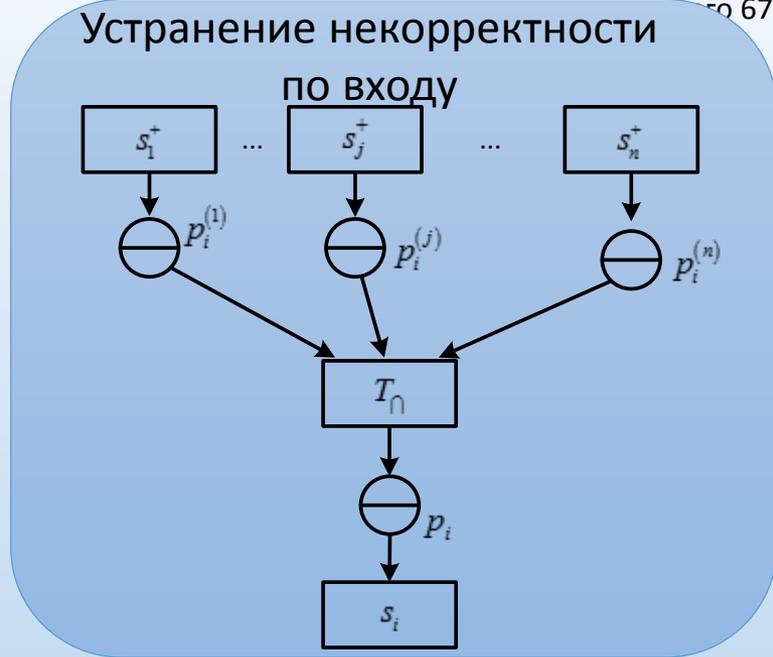
Непротиворечивость – свойство синтезированной модели ТП, согласно которому наложенные ограничения в виде предикатных переходов обеспечивают достижимость всех состояний процесса

$Q_k = \left\{ q_c^{(k)} \mid c = \overline{1, \text{card}(Q)} \right\}$	– множество ограничений операции S_k
$q_c^{(k)}(\cdot) = \text{"истина"}$	– условие выполнения с-го предикатного перехода – условие удовлетворения с-го ограничения операции S_k
$\bigcap_{c=1, \text{card}(Q)} \left(q_c^{(k)}(\cdot) \right) = \text{"истина"}$	– условие выполнения предикатных переходов операции S_k – условие удовлетворения ограничений операции S_k
$D_{q_c^{(k)}(\cdot)} = \left\{ \arg_{q_c^{(k)} = \text{"истина"}} q_c^{(k)}(\cdot) \right\}$	– область применимости с-го предикатного перехода – область аргументов с-го ограничения операции S_k , при которых данное ограничение удовлетворяется
$D_{S_k} = \bigcap_{c=1, \text{card}(Q)} D_{q_c^{(k)}(\cdot)}$	– область применимости предикатных переходов операции S_k – область аргументов ограничений операции S_k , при которых операция выполнима
$D_{\hat{\mathfrak{R}}} = \bigcap_{k=1, \text{card}(I_S)} D_{S_k}$	– область применимости процесса $\hat{\mathfrak{R}}$ – область аргументов ограничений процесса $\hat{\mathfrak{R}}$, при которых процесс выполним
$D_{\hat{\mathfrak{R}}} = \emptyset$	– условие непротиворечивости ограничений процесса $\hat{\mathfrak{R}}$
$D_{q_{1,2}^{(k)}(\cdot)} = \left\{ \arg_{\substack{q_1^{(k)} = \text{"истина"} \\ q_2^{(k)} = \text{"ложь"}}} q_{1,2}^{(k)}(\cdot) \right\} = \emptyset$	– условие возникновения критической ошибки вследствие противоречивости ограничений 1 и 2 операции S_k

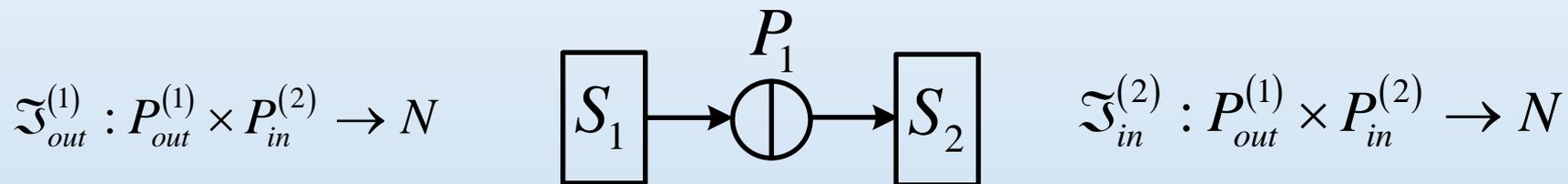
Корректность – свойство синтезированной модели ТП, согласно которому отсутствует неопределенность в смене состояний процесса



Фрагмент схемы модели с некорректностью операции S3 по входу относительно операций S1 и S2 и по выходу относительно операций S4 и S5



Активность (беступиковость) модели – свойство синтезированной модели ТП, согласно которому всегда возможно перевести процесс в очередное состояние с помощью соответствующей функции инцидентности



$P_1 = \{ P_{out}^{(1)}, P_{in}^{(2)} \}$ - множество «склеиваемых» выходных и входных позиций

$$P_{out}^{(1)} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ИндЗадНач}^{(1)}, \text{ИндНач}^{(1)}, \text{ИндВып}^{(1)}, \\ \text{ИндЗакДлит}^{(1)}, \text{ИндЗакКон}^{(1)}, \text{ИндКон}^{(1)} \end{array} \right\}$$

$$P_{in}^{(2)} = \{ \text{Старт}^{(2)}, \text{ОС}^{(2)}, \text{ПриостВып}^{(2)}, \text{ПродВып}^{(2)}, \text{Стоп}^{(2)} \}$$

$N > 0$ - условие активности операции S_2

После проверки всех условий, формируется непротиворечивая, корректная, беступиковая модель технологического процесса, что в совокупности позволяет говорить об успешной верификации синтезированной модели технологического процесса

$$m(p_i)$$

$$M_{out}^{(k)} = \{m(p_i) \mid p_i \in P_{out}^{(k)}\}$$

$$M_{out} = \{M_{out}^{(k)} \mid k = \overline{1, card(I_S)}\}$$

$$X = \langle M_{нач\ out}, \dots, M_{i\ out}, \dots, M_{кон\ out} \rangle$$

$$m_{ep}(p_i)$$

$$M_{ep\ out} = \{M_{ep\ out}^{(k)} \mid k = \overline{1, card(I_S)}\}$$

$$X_{ep} = \langle M_{ep\ нач\ out}, \dots, M_{ep\ i\ out}, \dots, M_{ep\ кон\ out} \rangle$$

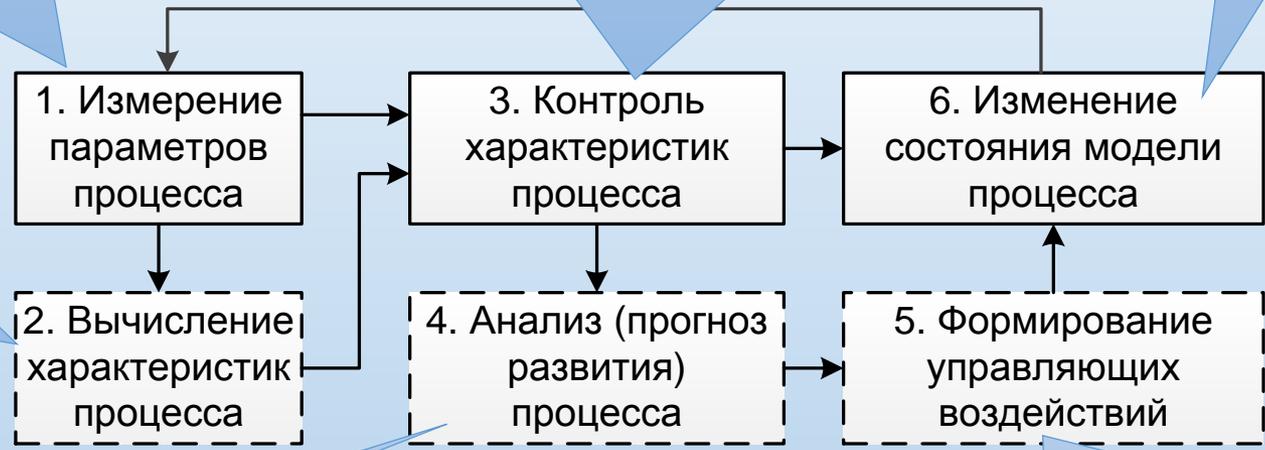
$$\Delta m(p_i) = m(p_i) - m_{ep}(p_i)$$

$$\mathfrak{S} = \begin{pmatrix} \mathfrak{S}_{in} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N \\ \mathfrak{S}_{out} : P_{out}^{(k)} \times P_{in}^{(m)} \rightarrow N \end{pmatrix}$$

$$Y : x_i \rightarrow y_i$$

$$y_i \in Y = \langle y_1, \dots, y_i, \dots, y_f \rangle$$

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



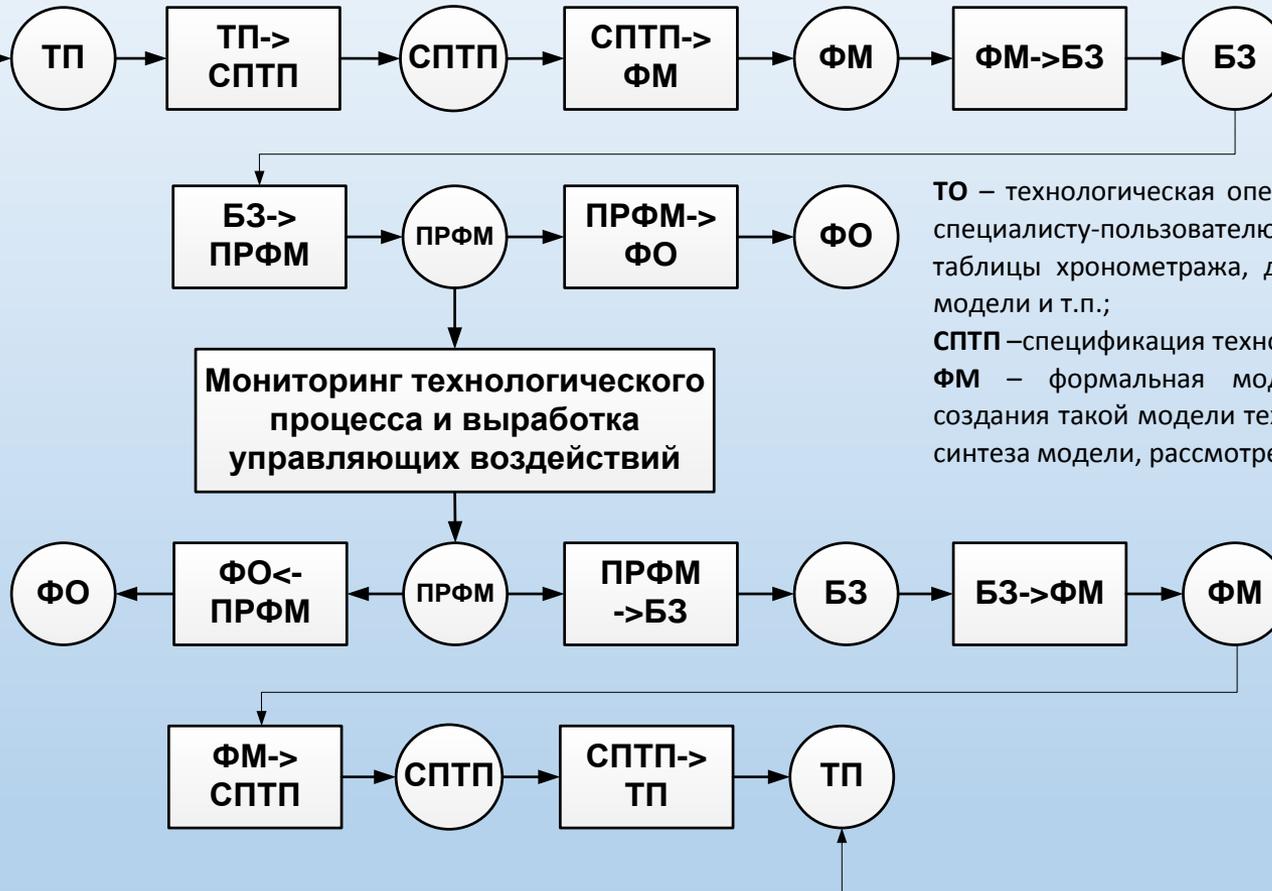
$$\Delta_D : \Delta \times M_{нач\ out} \times M_{кон\ out} \times Q \rightarrow \Delta_D;$$

$$\left(\begin{aligned} & (\exists \mathfrak{S}_{in}^{(k)} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N > 0) \cap \\ & \cap \left(m^{(k)}(p_i) \geq f^{(k)}(\langle p_i, t_j \rangle) \mid p_i \in P_{in}^{(k)} \right) \cap \\ & \cap \left(Q_k(m^{(k)}(p_i)) = \prod_{c=1}^{card(Q)} q_c^{(k)} = 1 \right) \end{aligned} \right) \Rightarrow \mathfrak{R}(1) \rightarrow \mathfrak{R}(2);$$

$$\Delta_D = \left\{ \Delta_t = \langle M_{нач\ in\ t}, \dots, M_{кон\ in\ t} \rangle, t = \overline{1, card(\Delta_D)} \right\}$$

Схема логического преобразования информации о технологическом процессе – порядок использования специалистом-пользователем унифицированной

программной платформы



ТО – технологическая операция, информация о которой представлена специалисту-пользователю в произвольном виде, например, в виде таблицы хронометража, диаграммы Ганта, с помощью рекурсивной модели и т.п.;

СПТП – спецификация технологического процесса;

ФМ – формальная модель технологического процесса, процесс создания такой модели технологического процесса является процессом синтеза модели, рассмотренным выше;

БЗ – база знаний, программно реализованная и объективно существующая структура хранения и применения правил обработки и анализа информации об объекте мониторинга – основная единица (компонент) единого информационного пространства, в данную базу формальная модель поступает после проверки ее адекватности спецификации технологического процесса и верификации по трем составляющим, выше рассмотренным;

ПРФМ – программная реализация формальной модели технологического процесса является продуктом унифицированной программной платформы;

ФО – форма отображения программной реализации формальной модели технологического процесса, также является продуктом унифицированной программной платформы и используется для визуального отображения траектории технологического процесса.

Метод уменьшения вычислительной ресурсоемкости реализации структурно-логического подхода

Определение вычислительной ресурсоемкости

Под **вычислительной сложностью** вычислений понимается зависимость объёма вычислительных действий от размера входных данных [Алгоритмы и структуры данных / Н. Вирт – СПб.: Невский диалект, 2001 г. – 352 с.].



Вычислительная сложность практической реализации структурно-логического подхода будет равна произведению количества ТО и количества используемых элементов-переменных в модели одной ТО

Требование решения задач в МРВ

Временная сложность вычислений представляет собой длительность проведения вычислительных действий в соответствии с размерностью входных данных [там же].



Вычислительная ресурсоемкость определяется как производная от временной сложности подхода по времени: количество смен значений переменных в единицу времени

Сравнение результатов уменьшения вычислительной ресурсоемкости

35

Всего 67

Расстановка приоритета в зависимости от функции выхода перехода



Уменьшение вычислительной ресурсоемкости составит величину порядка **1,2** раза (с 7400 до 6400 изменений переменных в сек. для модели одной ТО)

Выбор существенного отсчета в зависимости от его информационного содержания



Вычислительная ресурсоемкость составит величину 672 изменений переменных в сек. для одной модели ТО. Уменьшение вычислительной ресурсоемкости составит примерно **11** раз.

Запрет на прием новых отсчетов события до момента срабатывания всех разрешенных переходов сети



Вычислительная ресурсоемкость составит величину порядка 500 изменений переменных в сек. для одной модели ТО. Вычислительная ресурсоемкость уменьшится примерно в **15** раз.

Методология оптимизации технологического процесса на основе структурно-логического подхода

Варианты развития ТП в рамках СЛП

$$\Delta_D : \Delta \times M_{нач\ out} \times M_{кон\ out} \times Q \rightarrow \Delta_D$$

- Δ – множество всех вариантов управляющих воздействий (Δ_D - допустимое);
- $M_{нач\ out} = \left\{ M_{нач\ k\ out} \mid k = \overline{1, card(I_S)} \right\}$ – множество начальных (исходных) состояний ТП;
- $M_{кон\ out} = \left\{ M_{кон\ k\ out} \mid k = \overline{1, card(I_S)} \right\}$ – множество требуемых состояний ТП;
- Q – множество отношений, ограничивающих выбор.

(2)

$$M : M_{вн} \times M_{ин} \times M_{out},$$

- $card(M) = card(M_{вн}) \cdot card(M_{ин}) \cdot card(M_{out})$,
- $M_{вн}$, $M_{ин}$ и M_{out} – множества возможных разметок фрагментов модели ТО, состоящих из, соответственно, только внутренних, входных и выходных позиций $P_{вн}$, P_{out} и $P_{ин}$,
- $M_{вн} : P_{вн} \rightarrow N$, $M_{ин} : P_{ин} \rightarrow N$ и $M_{out} : P_{out} \rightarrow N$ – функции разметки, которые каждому элементу $p_i \in P_{вн}$, $p_i \in P_{ин}$ и $p_i \in P_{out}$ ставят в соответствие элемент множества целых неотрицательных чисел N .

Из всей совокупности множества позиций $P = \{ p_i \mid i \in I_P \} = \{ P_{вн}, P_{ин}, P_{out} \}$ необходимо выделить множество P_{out} , т.к. именно это множество отражает состояние операции, и по смене разметок только этих позиций будет приниматься решение о наблюдаемом (текущем) состоянии моделируемой операции, и, следовательно, о развитии процесса.

в рамках СЛП

$$\Delta^* = K(\mathfrak{R}, \Delta, Q, R),$$

где:

K – некоторая функция, значением которой является оптимальный кортеж Δ^* разметок входных позиций обобщенных схем операций технологического процесса, а аргументами которой являются следующие множества:

\mathfrak{R} – модель технологического процесса,

Δ – множество вариантов кортежей разметок входных позиций обобщенных схем операций технологического процесса;

Q – множество отношений, ограничивающих выбор и отражающих технологические, технические, краевые, ресурсные, пространственно-временные требования и другие требования,

$R = \{r_i, i = \overline{1, \text{card}(R)}\}$ – множество отношений предпочтения

(показателей эффективности), определяющих выбор оптимального кортежа Δ^* на множестве Δ разметок входных позиций обобщенных схем операций технологического процесса.

**Метод оптимизации
технологического процесса на основе
динамического программирования
по структурно-логическому подходу**

Обоснование применимости МДП на модели ТП в рамках СЛП

1. Дискретность функционирования обобщенных схем операций технологического процесса и, следовательно, модели всего процесса в целом



$$(p_{in} = OC) \in P_{in}$$

1. Смена состояния модели ТО предполагается только по поступлению управляющего сигнала в позицию «ОС»

Вып.

2. Ограниченность количества возможных состояний модели процесса и, кроме того, закрепление левого и правого концов фазовой траектории моделируемого процесса



$$(card(M_{out}), M_{нач\ out}, M_{кон\ out}) = const$$

2. Мощность множества выходных разметок является ограниченной, начальная и конечная выходные разметки заранее определены.

Вып.

3. Аддитивность показателя оптимальности



$$r_i, i = \overline{1, card(R)}$$

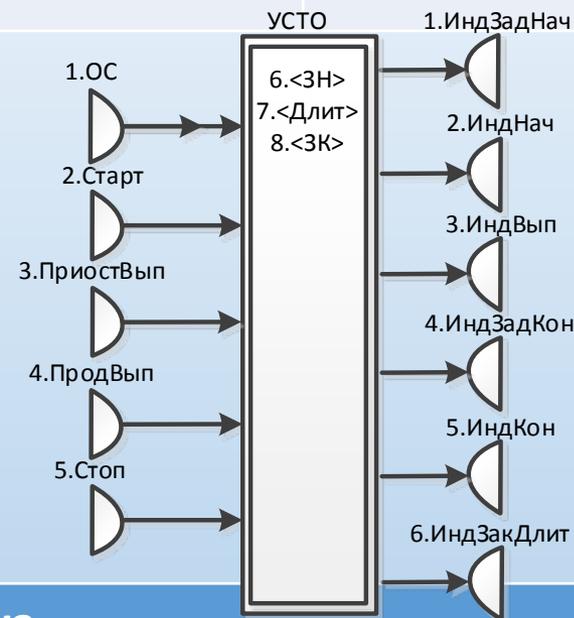
3. Формирование аддитивного показателя осуществляется непосредственно на этапе решения конкретной практической задачи.

+/-

Текущая выходная разметка

ИндЗадНач	ИндНач	ИндВып	ИндЗадКон	ИндКон	ИндЗадДлит
10	-	5	0	-	-

№ варианта входной разметки	Значение управляющих элементов					Значение J
	ОС	Старт	Приост Вып	Прод Вып	Стоп	
1	+	*	-	-	*	1
2	+	*	+	-	*	2
3	+	*	-	-	+	1
...						



Предыдущая выходная разметка

ИндЗадНач	ИндНач	ИндВып	ИндЗадКон	ИндКон	ИндЗадДлит
10	-	4	0	-	-

$$v_{OC} \left(M_{out} (OC) \right) = \arg \min_{M_{in}(OC) \in M_{in}} \left[R \left(M_{out} (OC), M_{in} (OC) \right) + J_{\min} \left(M_{out} (OC), OC \right) + 1 \right]$$

при $OC = N - 1, N - 2, \dots, 1, 0$.

Функция $v_{OC} \left(M_{out} (OC) \right)$ определяет оптимальное управление при получении OC при условии, что процесс находится в состоянии $M_{out} (OC)$.

№ шага управления	Значение управляющих элементов (входная разметка)					Текущая выходная разметка					
	ОС	Старт	ПриостВып	ПродВып	Стоп	ИндЗадНач	ИндНач	ИндВып	ИндЗадКон	ИндКон	ИндЗакДлит
0	+	+	-	-	-	1	+	0	0	-	-
1	+	*	+	-	-	1	+	0	0	-	-
I	...										
N-2	+	*	-	-	-	10	+	10	9	-	-
N-1	+	*	-	-	+	10	+	10	10	+	+

$$M_{in}(OC) = v_{OC}(M_{out}(OC)), \quad M_{out}(OC+1) = f(M_{out}(OC), M_{in}(OC)),$$

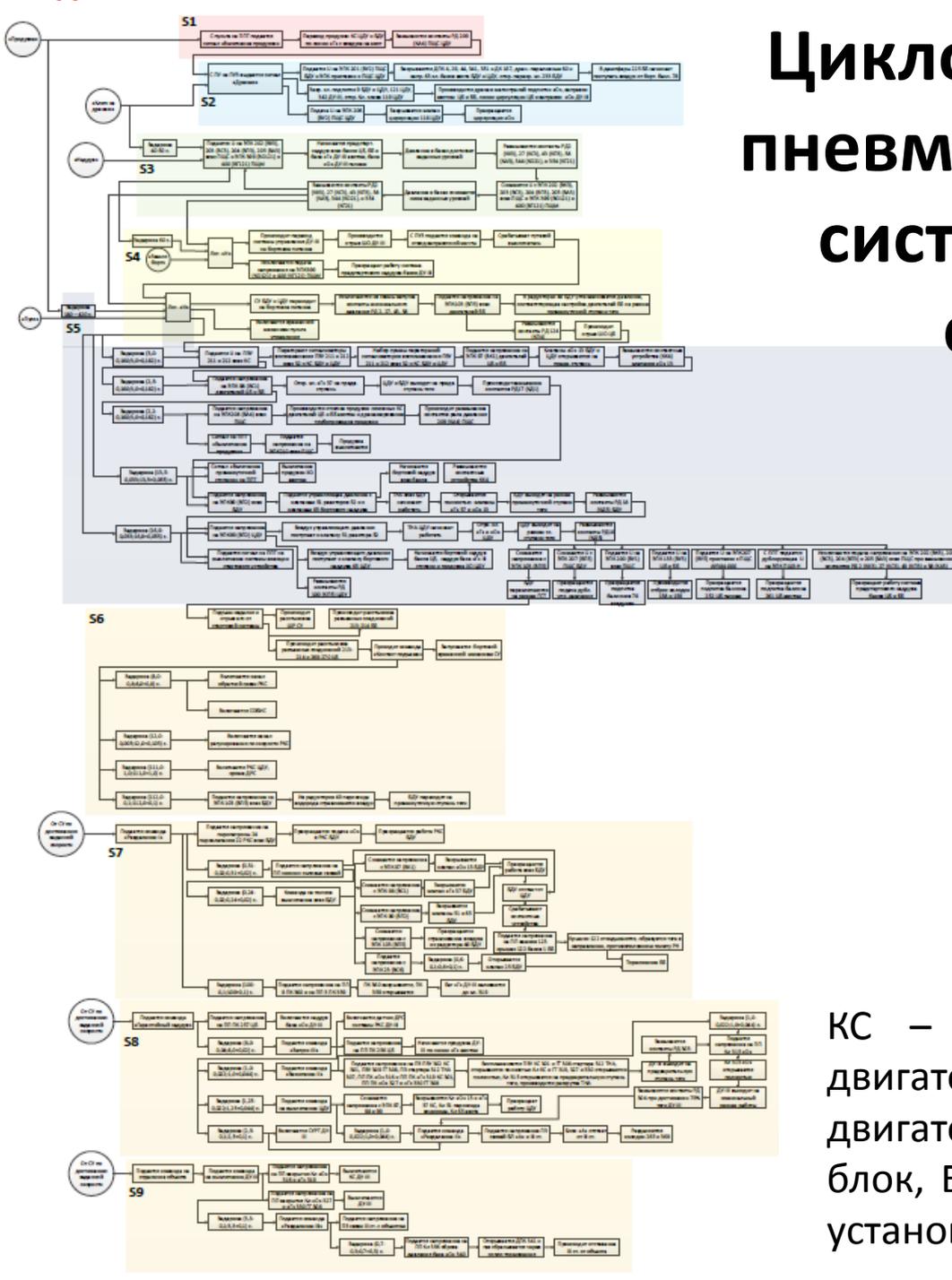
$$M_{out}(0) = M_{нач\ out}, \quad OC = 0, 1, \dots, N-1.$$

Соотношения определяют прямую процедуру и позволяют полностью рассчитать оптимальное управление и оптимальную траекторию.

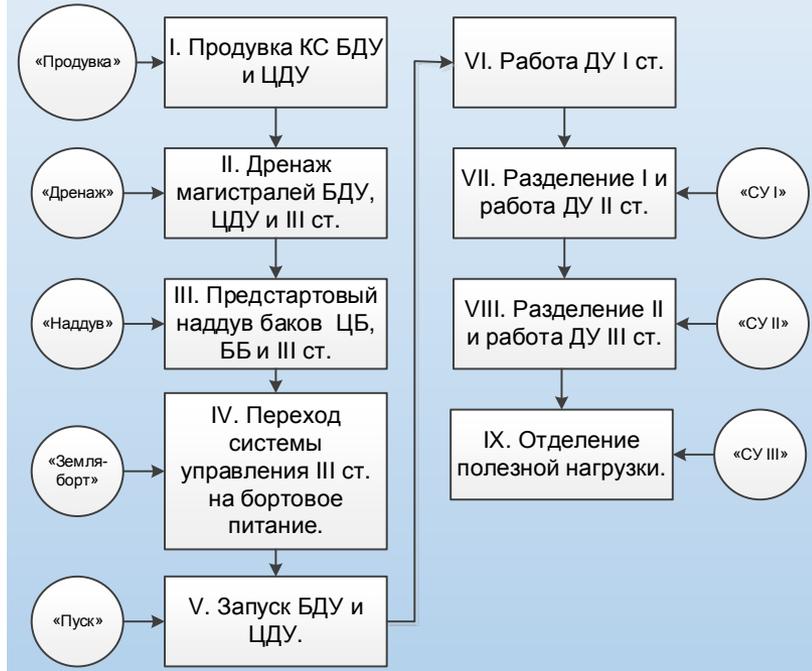
Технология мониторинга пнеумогидравлической системы двигательной установки РН Союз-2

- 3 часа – длительность оперативной и экспресс обработки и анализа ТМИ;
- 59 параметров телеметрируется с ПГС ДУ блоков А, Б, В, Г, Д и И;
- 109 характеристик оценивается для формирования Отчета по результатам подготовки к пуску, пуска и полета РН;
- 25 вариантов нештатных ситуаций предусмотрено ТД;
- 176 операций предусмотрено ТД при подготовке к пуску, пуске и полете РН;
- 113 операций определяются результатами контроля ТМП.

Циклограмма работы пневмогидравлической системы РН Союз-2 согласно ТД

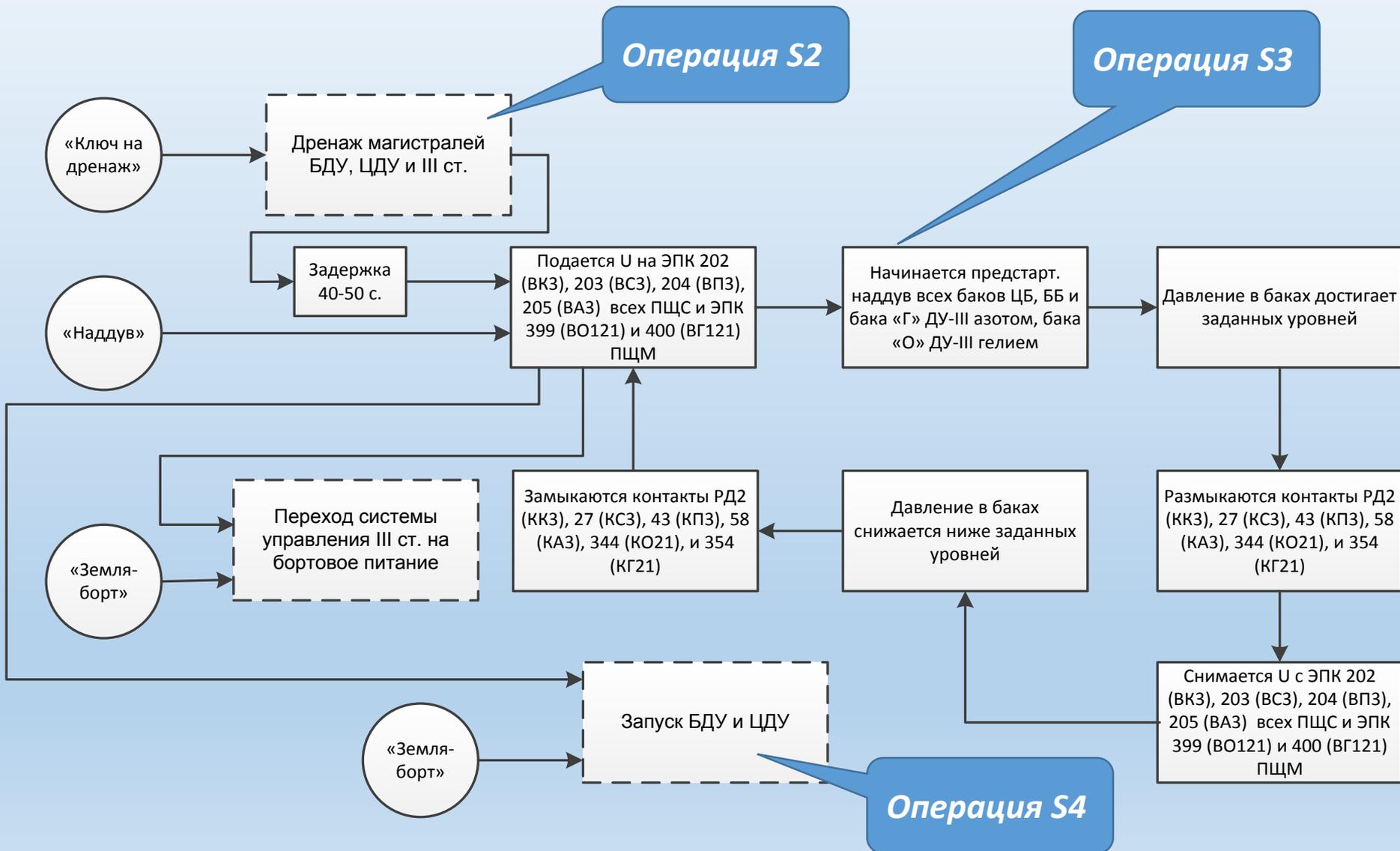


согласно ТД



КС – камера сгорания, БДУ – боковая двигательная установка, ЦДУ – центральная двигательная установка, ЦБ – центральный блок, ББ – боковой блок, ДУ – двигательная установка

ЦИКЛОГРАММА НАДДУВА БАКОВ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ РН СОЮЗ-2



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЦИКЛОГРАММЫ НАДДУВА

БАКОВ ПГС

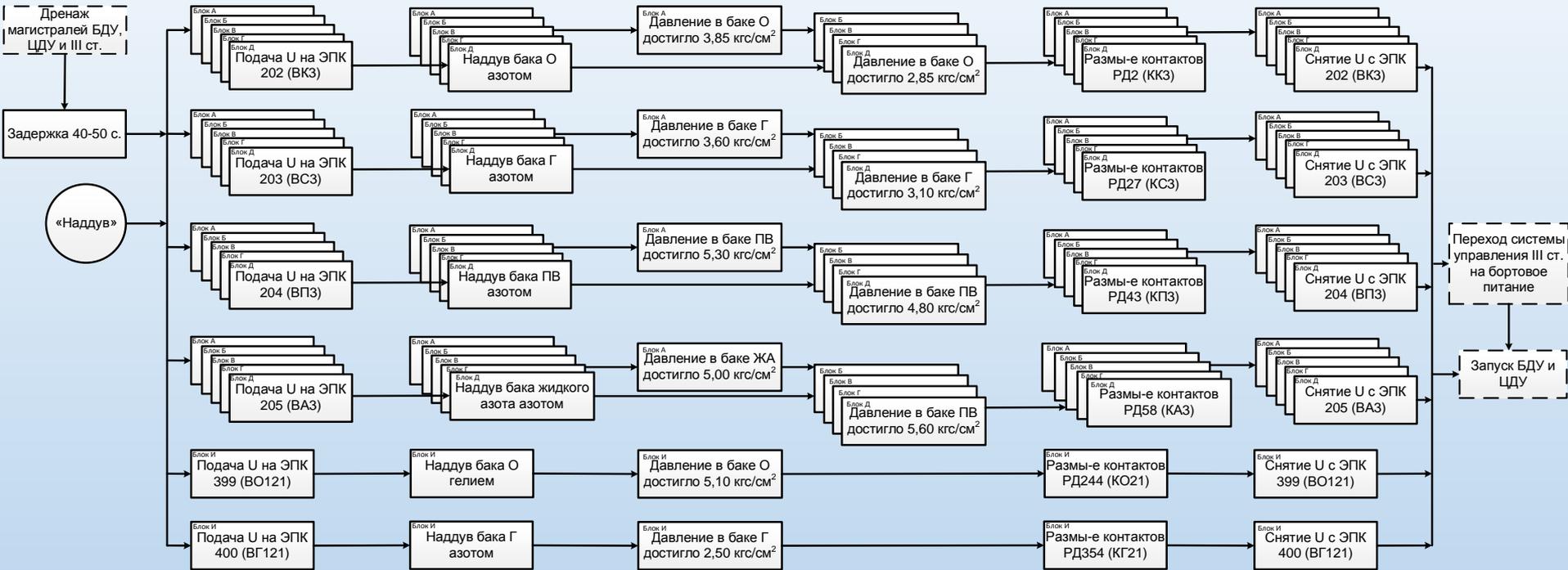


Рисунок 1 – Циклограмма функционирования ПГС ДУ РН Союз-2

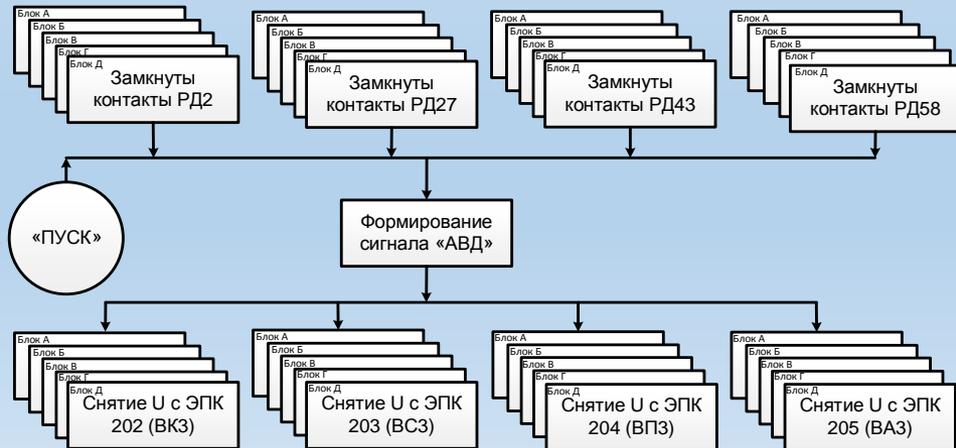
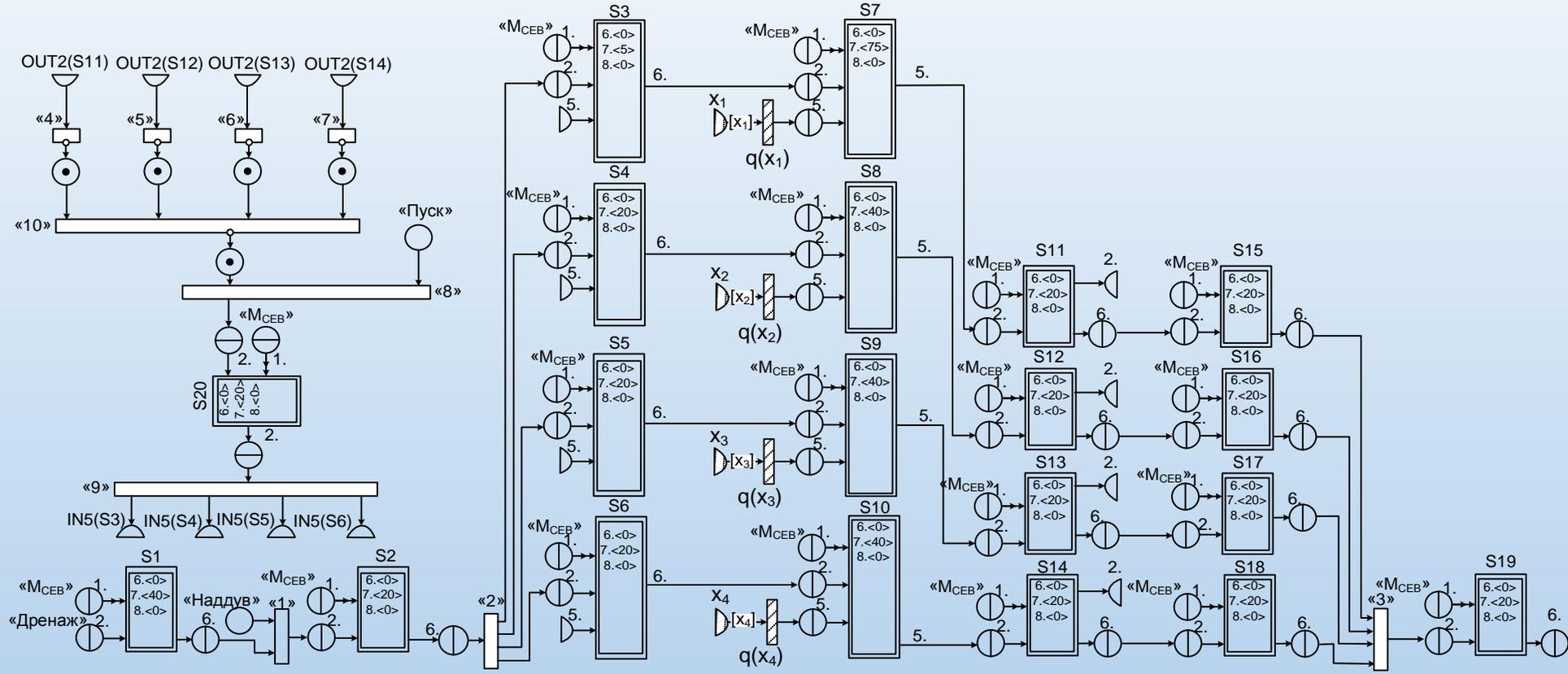


Рисунок 2 – Схема формирования сигнала «АВД» при наддуве баков РН Союз-2

СПЕЦИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА НАДДУВА БАКОВ БЛОКА Б РН СОЮЗ-2

k	$S_k \mid k = 1, \overline{\text{card}(I_S)}$	$\Pr(B_b^{(k)})$	$\Pr(B_f^{(k)})$	t_k	τ_k
1.	Задержка	«Дренаж»	По длит.	0	40
2.	Подготовка наддува баков ДУ блока Б	«Наддув» & О1	По длит.	40	20
3.	Подача U на ЭПК 202	О2	По длит. Н20	60	20
4.	Подача U на ЭПК 203	О2	По длит. Н20	60	20
5.	Подача U на ЭПК 204	О2	По длит. Н20	60	20
6.	Подача U на ЭПК 205	О2	По длит. Н20	60	20
7.	Наддув бака О	О3	ДБОб>2.85	80	40
8.	Наддув бака Г	О4	ДБГб>3.10	80	40
9.	Наддув бака ПВ	О5	ДБПб>4.80	80	40
10.	Наддув бака ЖА	О6	ДБАб>5.60	80	40
11.	Размыкание контактов РД2	О7	По длит.	120	20
12.	Размыкание контактов РД27	О8	По длит.	120	20
13.	Размыкание контактов РД43	О9	По длит.	120	20
14.	Размыкание контактов РД58	О10	По длит.	120	20
15.	Снятие U с ЭПК 202	О11	По длит.	140	20
16.	Снятие U с ЭПК 203	О12	По длит.	140	20
17.	Снятие U с ЭПК 204	О13	По длит.	140	20
18.	Снятие U с ЭПК 205	О14	По длит.	140	20
19.	Окончание наддува баков ДУ блока Б	О15 & О16 & О17 & О18	По длит.	140	20
20.	Формирование сигнала «АВД»	«Пуск» & (ДБОб<2.85 ДБГб<3.10 ДБПб<4.80 ДБАб<5.60)	По длит.	140	20

СИНТЕЗ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАДДУВА БАКОВ БЛОКА Б РН СОЮЗ-2



Общий вид функции инцидентности и функция для S₃ и S₇:

$$\mathfrak{S} = \left\{ \mathfrak{S}_k = \begin{cases} \mathfrak{S}_{in}^{(k)} : P_{out}^{(l)} \times P_{in}^{(k)} \rightarrow N \\ \mathfrak{S}_{out}^{(k)} : P_{out}^{(k)} \times P_{in}^{(m)} \rightarrow N \end{cases} \right\}_{k,l,m = \overline{1,20}}$$

$$\mathfrak{S}_3 = \begin{cases} \mathfrak{S}_{in}^{(3)} = \left\{ \begin{aligned} &\mathfrak{S}_{in1}^{(3)} \langle M_{CEB}, OC \rangle = 1, \\ &\mathfrak{S}_{in2}^{(3)} \langle "2", Старт \rangle = 1, \\ &\mathfrak{S}_{in3}^{(3)} \langle "10", Стоп \rangle = 1, \end{aligned} \right. \\ \mathfrak{S}_{out}^{(3)} = \left\{ \mathfrak{S}_{out1}^{(3)} \langle ИндЗакДлит, Старт^{(7)} \rangle = 1 \right\} \end{cases}$$

$$\mathfrak{S}_7 = \begin{cases} \mathfrak{S}_{in}^{(7)} = \left\{ \begin{aligned} &\mathfrak{S}_{in1}^{(7)} \langle M_{CEB}, OC \rangle = 1, \\ &\mathfrak{S}_{in2}^{(7)} \langle ИндЗакДлит^{(3)}, Старт \rangle = 1 \\ &\mathfrak{S}_{in3}^{(7)} \langle q(x_1), Стоп \rangle = 1 \end{aligned} \right. \\ \mathfrak{S}_{out}^{(7)} = \left\{ \mathfrak{S}_{out1}^{(7)} \langle ИндЗак, Старт^{(11)} \rangle = 1 \right\} \end{cases}$$

МОНИТОРИНГ НАДДУВА БАКОВ БЛОКА Б РН СОЮЗ-2

50

Всего 67

Реализованный результат контроля функционирования системы наддува:

Номер операции	Контролируемая выходная позиция	Характерные моменты циклограммы						
		0	48	71	91	143	172	192
1	«ИндНач»	1	1	1	1	1	1	1
	«ИндЗакДлит»	0	1	1	1	1	1	1
2	«ИндНач»	0	1	1	1	1	1	1
	«ИндЗакДлит»	0	0	1	1	1	1	1
3	«ИндНач»	0	0	1	1	1	1	1
	«ИндЗакДлит»	0	0	0	1	1	1	1
	«ИндЗак»	0	0	0	0	0	0	0
...
7	«ИндНач»	0	0	0	1	1	1	1
	«ИндЗак»	0	0	0	0	1	1	1
...
19	«ИндНач»	0	0	0	0	0	1	1
	«ИндЗакДлит»	0	0	0	0	0	0	1
20	«ИндНач»	0	0	0	0	0	0	0
	«ИндЗакДлит»	0	0	0	0	0	0	0

МОНИТОРИНГ НАДДУВА БАКОВ БЛОКА Б РН СОЮЗ-2

51

Всего 67

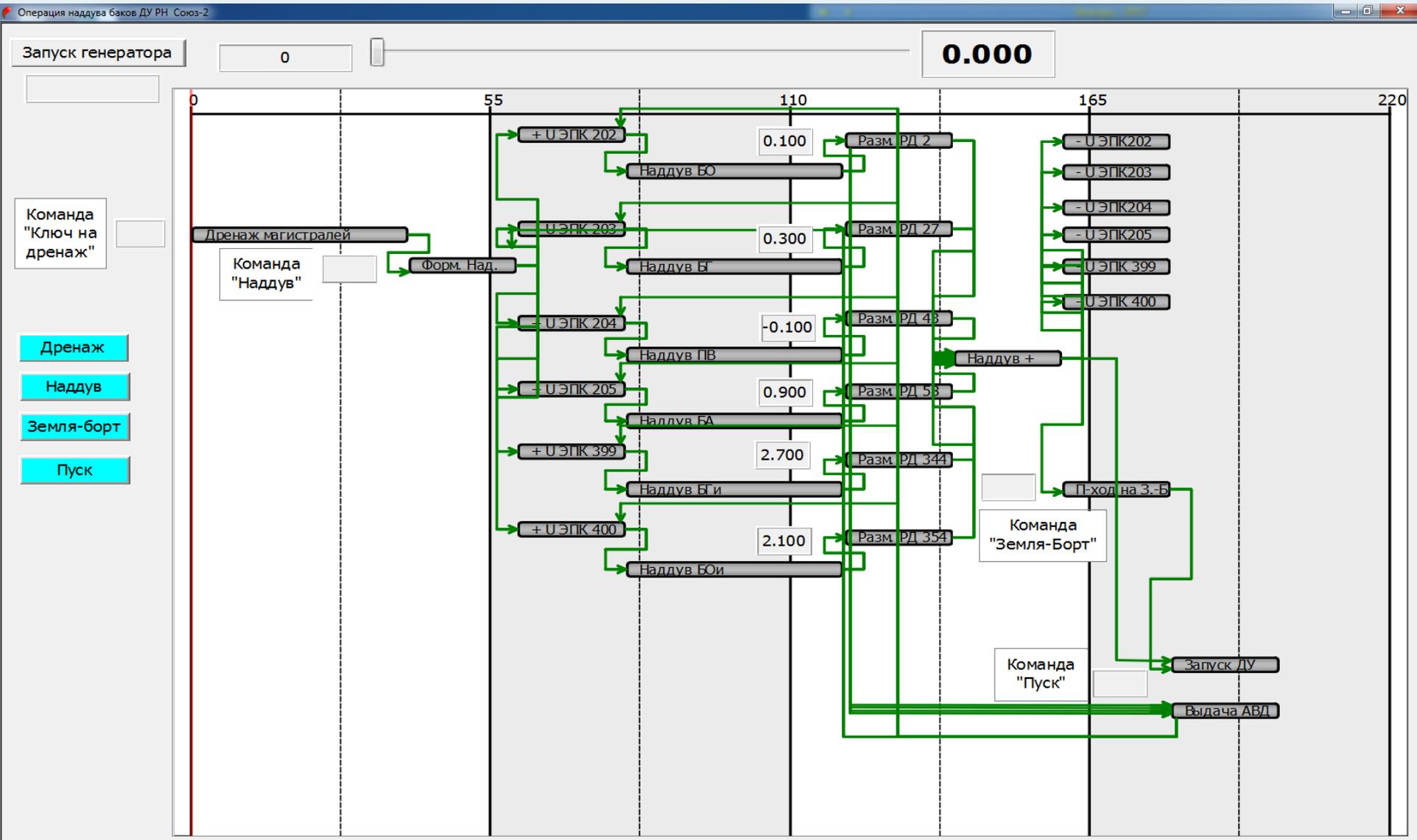
Реализованный результат контроля функционирования системы наддува при выдаче сигнала «АВД»

Номер операции	Выходная позиция	Характерные моменты циклограммы				
		0	42	62	65	85
1	«ИндНач»	1	1	1	1	1
	«ИндЗакДлит»	0	1	1	1	1
2	«ИндНач»	0	1	1	1	1
	«ИндЗакДлит»	0	0	1	1	1
3	«ИндНач»	0	0	1	1	1
	«ИндЗакДлит»	0	0	0	0	0
	«ИндЗак»	0	0	0	1	1
...
20	«ИндНач»	0	0	0	1	1
	«ИндЗакДлит»	0	0	0	0	1

ОЖИДАЕМАЯ (ПЛАНИРУЕМАЯ) ЦИКЛОГРАММА НАДДУВА БАКОВ ПГС ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

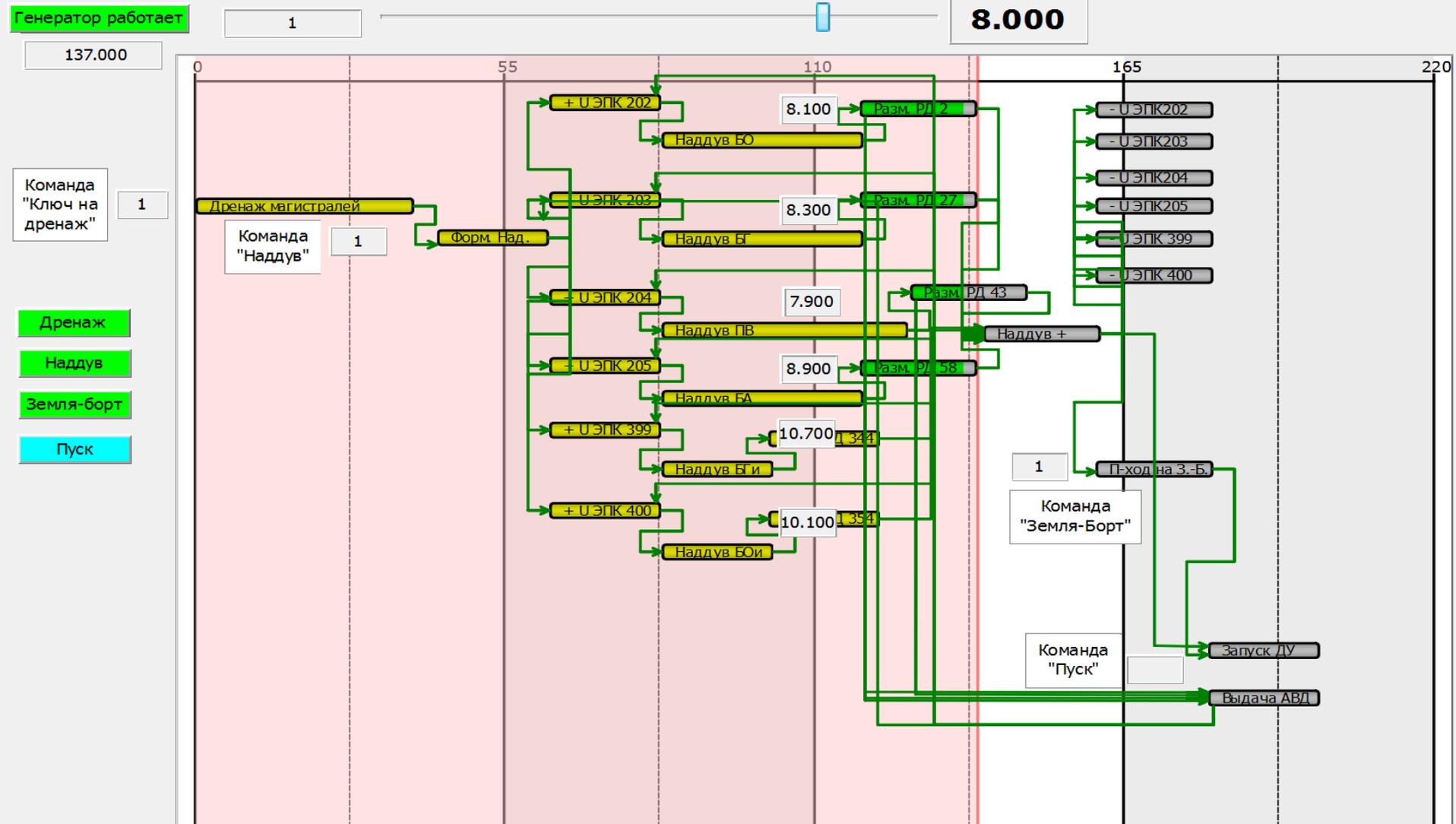
52

Всего 67

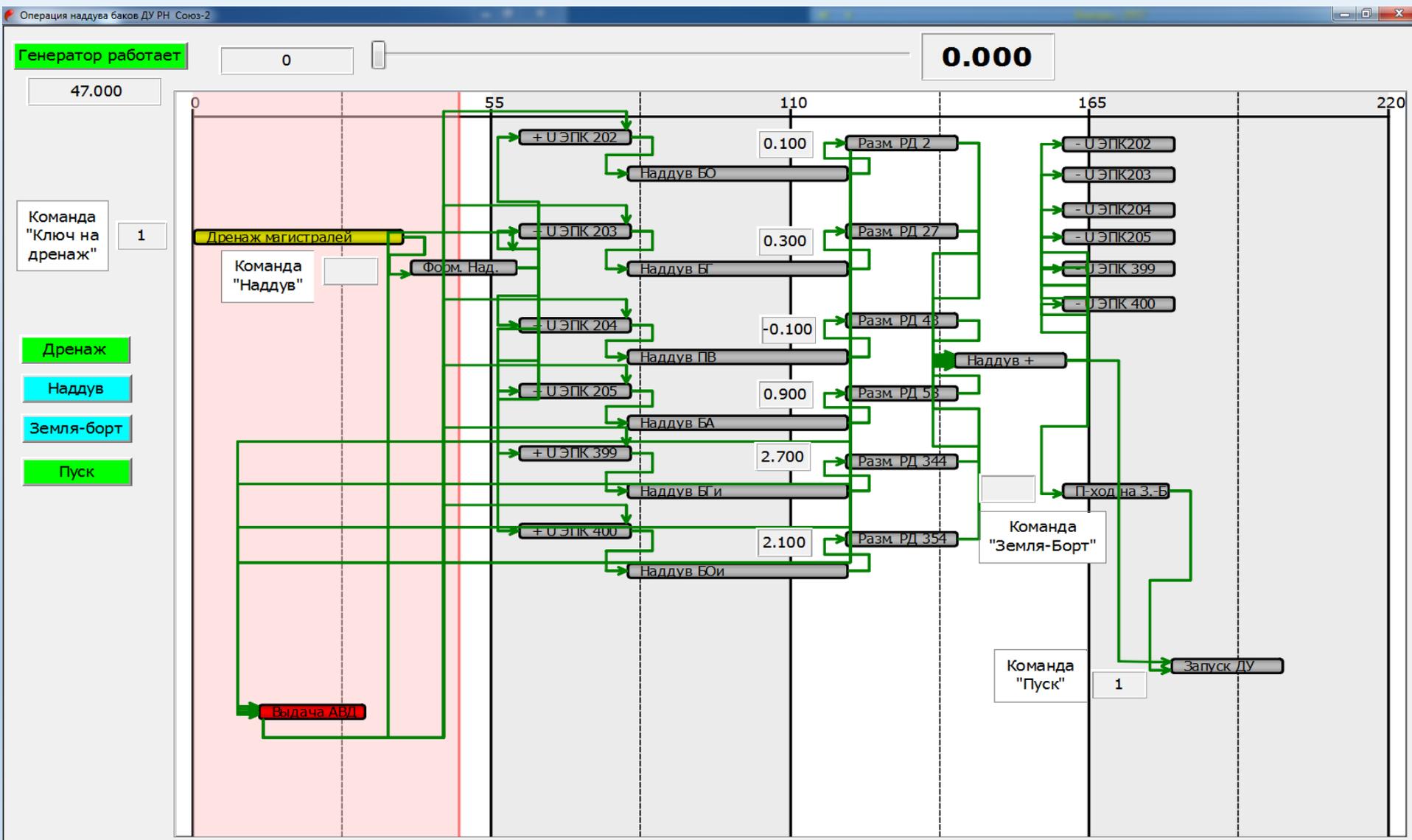


РЕАЛИЗОВАННАЯ (ПРОГНОЗИРУЕМАЯ) ЦИКЛОГРАММА НАДДУВА БАКОВ ПГС ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ. «ШТАТНЫЙ РЕЖИМ»

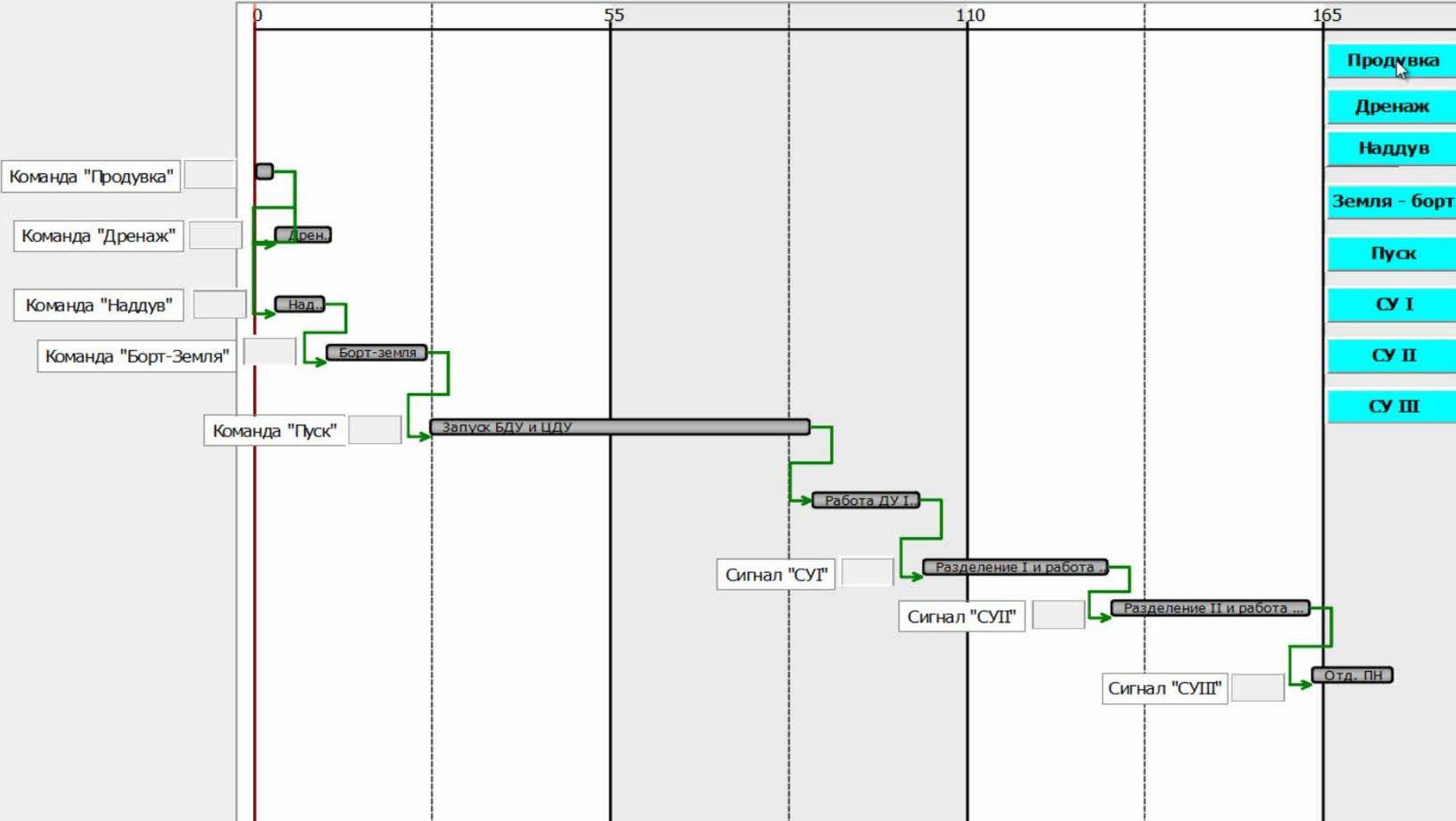
Операция наддува баков ДУ РН Союз-2



РЕАЛИЗОВАННАЯ (ПРОГНОЗИРУЕМАЯ) ЦИКЛОГРАММА НАДДУВА БАКОВ ПГС ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ. РЕЖИМ С ФОРМИРОВАНИЕМ КОМАНДЫ «АВД»



Запуск генератора

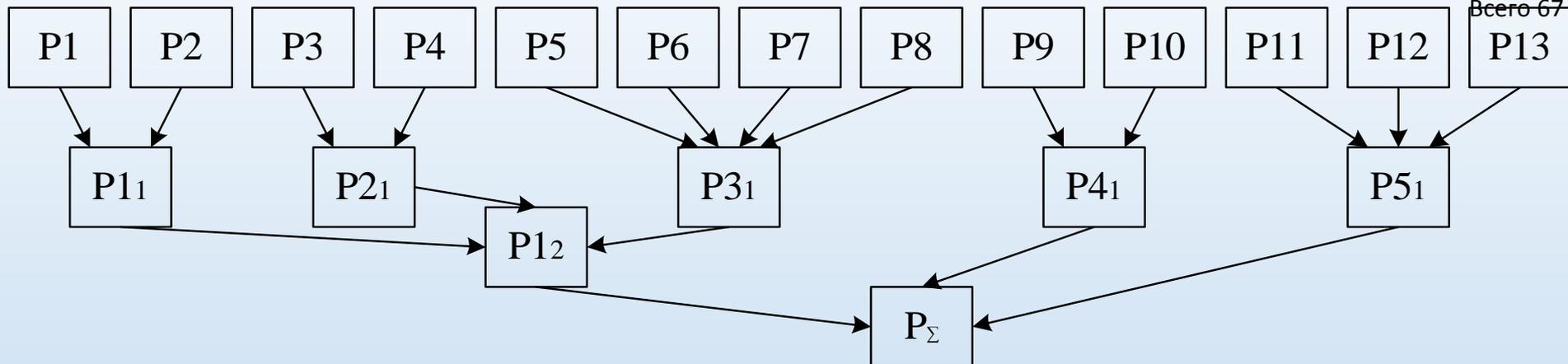


Система показателей качества мониторинга технологических процессов в ракетно-космической отрасли

1. Бураков В.В. Управление качеством программных средств: Монография / В.В. Бураков. – СПб.: ГУАП, 2009. – 288 с.
2. Липаев В.В. Программная инженерия. Методологические основы: Учебник / В.В. Липаев. – М.: Теис, 2006. – 608 с.
3. Боэм Б.У. Инженерное проектирование программного обеспечения. Пер. с англ. / Под ред. А.А. Красилова. – М.: Радио и связь, 1985. – 512 с.
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25021-2014. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения. (SQuaRE). Элементы показателя качества. М.: Стандартинформ, 2015. – 103 с.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов. М.: Стандартинформ, 2016. – 36 с.
6. ГОСТ 1410-002-2010. Ракетно-космическая техника. Система информации о техническом состоянии и надежности космических комплексов и входящих в их состав изделий. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2011. – 49 с.

№ п/п	Содержание ЧП	Формула ЧП
1.	<p>Частный показатель p_1 – точность телеметрируемых параметров (ТМП):</p> <ul style="list-style-type: none"> – $x_j, j = \overline{1, N_{ТМП}}$ – ТМП, используемые в СПО мониторинга; – $\delta_{ТМ} = 0,8\%$ – максимальная приведенная погрешность бортовой аппаратуры с учетом «наземной» автоматизированной обработки ТМП, значение которой приведено в Программе телеизмерений, выпускаемой в комплекте технической документации на РН; – $\sigma_{ТМ}$ – СКО приведенной погрешности бортовой аппаратуры с учетом «наземной» автоматизированной обработки ТМП; – $\delta(x_j)$ – максимальная приведенная погрешность измерения j-го датчика, значение которой приводится в технических характеристиках датчиков, тип датчиков приводится в Программе телеизмерений; – $\sigma(x_j)$ – СКО приведенной погрешности измерения j-го датчика. 	$p_1 = 1 - 3 \sqrt{\sigma_{ТМ}^2 + \sum_{j=1}^{N_{ТМП}} \sigma^2(x_j)};$ $\sigma_{ТМ} = \frac{\delta_{ТМ}}{3};$ $\sigma(x_j) = \frac{\delta(x_j)}{3}$
2.	<p>Частный показатель p_2 – точность оценивания значений летно-технических характеристик (ЛТХ):</p> <ul style="list-style-type: none"> – $y_q(x), q = \overline{1, N_{ЛТХ}}$ – ЛТХ, используемая в СПО мониторинга. ЛТХ приведены в технической документации; – $y_q = f(x_i), i = \overline{1, N_{ТМП}^{(q)}}$ – функция q-ой ЛТХ от ТМП x_i, приводится в технической документации; – $\sigma(y_q)$ – СКО приведенной погрешности вычисления q-ой ЛТХ; – $\sigma(x_i)$ – СКО приведенной погрешности измерения i-го датчика. 	$p_2 = 1 - 3 \sqrt{\sum_{q=1}^{N_{ЛТХ}} \sigma^2(y_q)};$ $\sigma(y_q) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{ТМП}^{(q)}} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \sigma(x_i) \right)^2}$
3.	<p>Частный показатель p_3 – своевременность получения результата мониторинга:</p> <ul style="list-style-type: none"> – T_{III} – длительность подготовки исходной информации и применения СПО для мониторинга процесса функционирования ПГС от команды «Продувка» до окончания работы ДУИИ; $T_{mp} = 3 \text{ часа}$ – длительность оперативной и экспресс обработки и анализа ТМИ. 	$p_3 = \frac{1}{\frac{ T_{mp} - T_{III} }{T_{mp}} + 1}$
4.	<p>Частный показатель p_4 – оперативность получения результата мониторинга:</p> <ul style="list-style-type: none"> – T_{II} – длительность подготовки исходной информации и применения СПО для мониторинга процесса подготовки носителя к пуску: от команды «Продувка» до команды «Пуск», когда возможно формирование команды на аварийное выключение двигателя (АВД) без потери полезной нагрузки (ПН). 	$p_4 = \frac{1}{\frac{T_{II}}{T_{mp}} + 1}$
5.	<p>Частный показатель p_5 – полнота обрабатываемой измерительной информации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – $N_{ТМП}$ – количество ТМП, используемых в СПО мониторинга; – $N_{ТМП}^{ДПМ} = 59 \text{ ед.}$ – количество ТМП, телеметрирующих процессы в ПГС – согласно Программе телеизмерений. 	$p_5 = \frac{N_{ТМП}}{N_{ТМП}^{ДПМ}}$
6.	<p>Частный показатель p_6 – полнота вычисляемых ЛТХ:</p> <ul style="list-style-type: none"> – $N_{ЛТХ}$ – количество ЛТХ, оценки которых формируются в СПО мониторинга и в дальнейшем используются для формирования результата мониторинга; – $N_{ЛТХ}^{ИЭ20} = 109 \text{ ед.}$ – количество ЛТХ, характеризующих ПГС ДУ РН Союз-2, в соответствии с технической документацией. 	$p_6 = \frac{N_{ЛТХ}}{N_{ЛТХ}^{ИЭ20}}$

№ п/п	Содержание ЧП	Формула ЧП
7.	Частный показатель p_7 – полнота учитываемых нештатных ситуаций: <ul style="list-style-type: none"> – N_{ABD} – количество учитываемых нештатных ситуаций в СПО мониторинга; – $N_{ABD}^{TO} = 25 \text{ ед.}$ – количество нештатных ситуаций, приводящих к прекращению подготовки носителя к пуску и к АВД при работе ДУ, приведенных в технической документации. 	$p_7 = \frac{N_{ABD}}{N_{ABD}^{TO}}$
8.	Частный показатель p_8 – полнота моделируемого технологического процесса: <ul style="list-style-type: none"> – N_{MOH} – количество моделируемых в СПО мониторинга операций процесса функционирования ПГС ДУ; – $N_{TO} = 176 \text{ ед.}$ – количество операций, предусмотренных в технической документации. 	$p_8 = \frac{N_{MOH}}{N_{TO}}$
9.	Частный показатель p_9 – анализируемость синтезированной модели процесса с учетом реализации различных видов ограничений процесса: <ul style="list-style-type: none"> – N_{OGR} – виды ограничений, реализуемые в СПО мониторинга. Для СЛП: ресурсные, временные, технические и технологические. Для рекурсивной модели: временные. – $N_{POG} = 5 \text{ ед.}$ – виды ограничений, потенциально применяемые при мониторинге процессов ПГС ДУ РН «Союз-2». Дополнительно к указанным: функциональные. 	$p_9 = \frac{N_{OGR}}{N_{POG}}$
10.	Частный показатель p_{10} – верифицируемость синтезированной модели процесса: <ul style="list-style-type: none"> – N_{OSH} – количество типов ошибок, выявляемых и корректируемых СПО мониторинга. Для СЛП: непротиворечивость ресурсных ограничений, корректность по входу и выходу операций, активность операций. Для рекурсивной модели: активность операций; – $N_{PO} = 5 \text{ ед.}$ – количество типов ошибок, потенциально формируемых при синтезе модели технологического процесса в предметной области, дополнительно к предыдущим: достижимость требуемого состояния процесса. 	$p_{10} = \frac{N_{OSH}}{N_{PO}}$
11.	Частный показатель p_{11} – однозначность результата мониторинга при неизменности измерительной информации: <ul style="list-style-type: none"> – N_{UTMI} – количество учитываемых в СПО мониторинга операций, свойства которых определяются результатами контроля ТМП; – $N_{TOI} = 113 \text{ ед.}$ – полное количество операций, свойства которых определяются результатами контроля ТМП. 	$p_{11} = \frac{N_{UTMI}}{N_{TOI}}$
12.	Частный показатель p_{12} – редактируемость синтезированной модели процесса: <ul style="list-style-type: none"> – N_{RED} – количество вариантов изменения траектории, реализуемых СПО мониторинга. Для СЛП: автоматизированное (ручное и автоматическое) изменение типа меток отсчета состояния, начало, остановка, приостановка, возобновление операции. Для рекурсивной модели: ручное начало, остановка, приостановка и возобновление операции; – $N_{IP} = 10 \text{ ед.}$ – количество вариантов изменения траектории, потенциально реализуемых при синтезе модели в предметной области. 	$p_{12} = \frac{N_{RED}}{N_{IP}}$
13.	Частный показатель p_{13} – повторяемость синтезированной модели процесса общесистемным ПО: <ul style="list-style-type: none"> – N_{PB} – количество операций, имеющих временные и технологические ограничения. Реализация данных ограничений возможна средствами Microsoft Project. 	$p_{13} = \frac{N_{PB}}{N_{MOH}}$



- $P_1...P_{13}$ – выше рассмотренные частные показатели качества;
- P_{1_1} – комплексированный показатель степени доверия к результатам мониторинга;
- P_{2_1} – комплексированный показатель степени соответствия временной характеристики результата мониторинга требуемым значениям;
- P_{3_1} – комплексированный показатель степени адекватности синтезированной для мониторинга модели технологического процесса своему прототипу;
- P_{4_1} – комплексированный показатель диагностируемости модели технологического процесса, характеризующий степень пригодности модели для поиска ошибок и недостатков;
- P_{5_1} – комплексированный показатель модифицируемости модели технологического процесса, характеризующий степень пригодности модели для модификации и совершенствования;
- P_{1_2} – комплексированный показатель эксплуатационных характеристик применения СПО мониторинга;
- P_{Σ} – единый конечный интегральный показатель (ЕКИП) качества мониторинга технологического процесса.

1. **РМВ (режим реального времени)** – мониторинг функционирования ПГС РН «Союз-2» на этапе оперативной и экспресс-обработки и анализа ТМИ.
2. **ППО (послеполетная обработка)** – анализ функционирования систем ПГС РН «Союз-2» на этапе послеполетной обработки ТМИ.
3. **ПНИ (подготовка новых изделий)** – подготовка СПО, подготовка спецификации процесса, создание и верификация моделей для вновь вводимых изделий РКТ.
4. **ПОГ (пополнение орбитальной группировки)** – мониторинг функционирования ПГС РН «Союз-2» на этапе оперативного пополнения орбитальной группировки КА.

Расчет показателя в различных режимах

Для лингвистической переменной сформированы значения: «очень низкое (ОН)», «низкое (Н)», «ниже среднего (НС)», «среднее (С)», «выше среднего (ВС)», «высокое (В)» и «очень высокое (ОВ)».

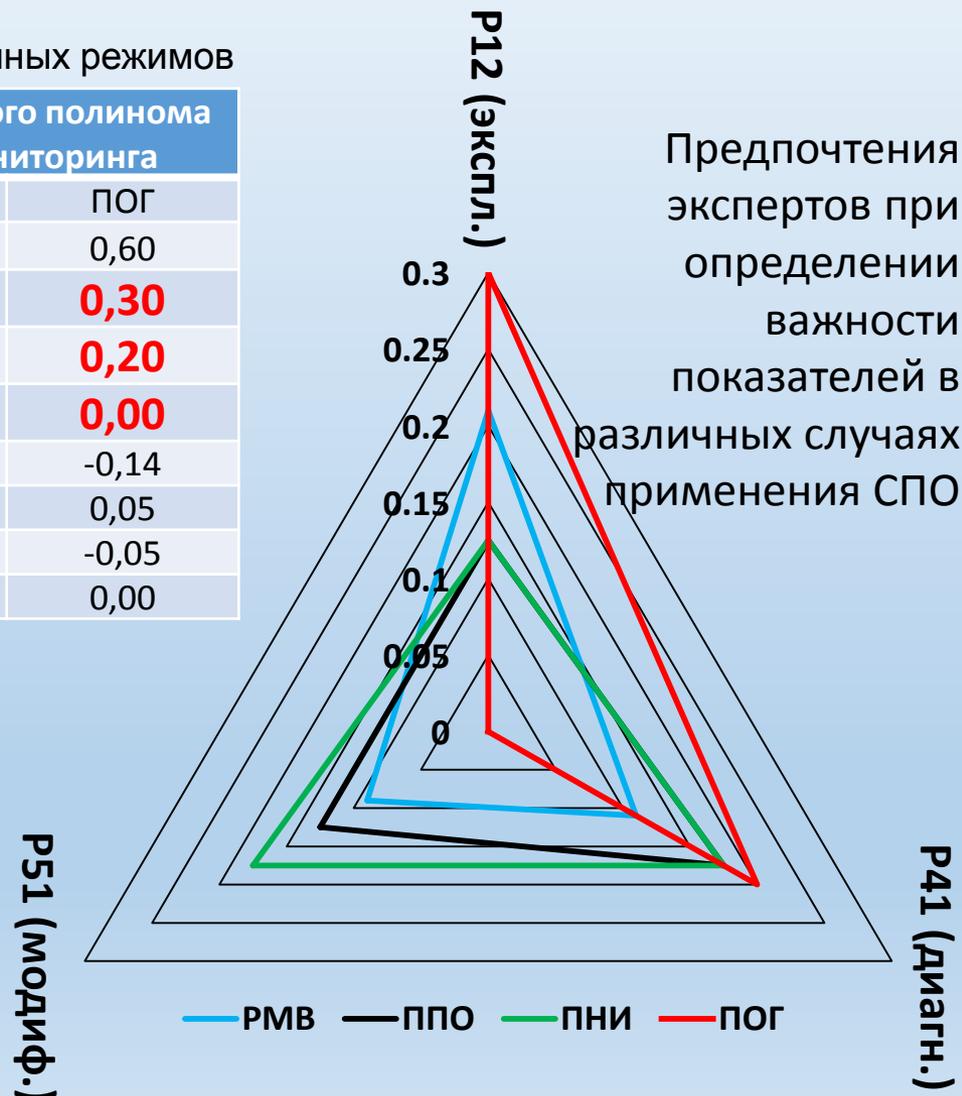
Дефаззификация проведена следующим образом: ОН – 0, Н – 0.1, НС – 0.3, С – 0.5, ВС – 0.7, В – 0.9 и ОВ – 1.

Коэффициенты интегрального полинома для различных режимов

№ п/п коэф.	Значение коэффициента интегрального полинома для режима применения СПО мониторинга			
	РМВ	ППО	ПНИ	ПОГ
0.	0,46	0,45	0,50	0,60
1. P12 (экспл.)	0,21	0,13	0,13	0,30
2. P41 (диагн.)	0,11	0,18	0,18	0,20
3. P51 (модиф.)	0,09	0,13	0,18	0,00
4.	-0,14	0,00	0,05	-0,14
5.	0,09	0,05	0,05	0,05
6.	0,09	0,00	-0,10	-0,05
7.	0,09	0,08	0,03	0,00

Коэффициенты интегрального полинома для ЕКИП

№ п/п	Значение коэф.	№ п/п	Значение коэф.
0.	0,69	8.	-0,03
1. РМВ	0,01	9.	-0,04
2. ППО	0,10	10.	-0,05
3. ПНИ	0,04	11.	0,00
4. ПОГ	0,23	12.	0,04
5.	0,00	13.	0,03
6.	-0,06	14.	0,06
7.	-0,03	15.	0,01



ЧП	Оцениваемые варианты СПО мониторинга		
	Существующее СПО мониторинга	Требуемое значение показателя	Разработанное СПО на основе СЛП
	Значения частных показателей качества мониторинга ПГС		
1.	0,94	0,90	0,81
2.	0,89	0,85	0,75
3.	0,33	0,90	0,92
4.	0,26	0,80	0,96
5.	0,14	0,75	0,83
6.	0,07	0,75	0,8
7.	0,03	0,75	0,88
8.	0,55	0,75	0,92
9.	0,20	0,75	0,80
10.	0,20	0,75	0,80
11.	0,21	0,75	0,97
12.	0,40	0,75	1,00
13.	0,87	0,75	0,45
Режим	Расчет ЕКИП качества мониторинга		
РМВ	0,42	0,71	0,69
ППО	0,42	0,77	0,81
ПНИ	0,40	0,77	0,84
ПОГ	0,48	0,88	0,92
ЕКИП	0,65	0,90	0,92

1 проц. 1 ГГц 2 проц. 2.2 ГГц 4 проц. 2.7 ГГц

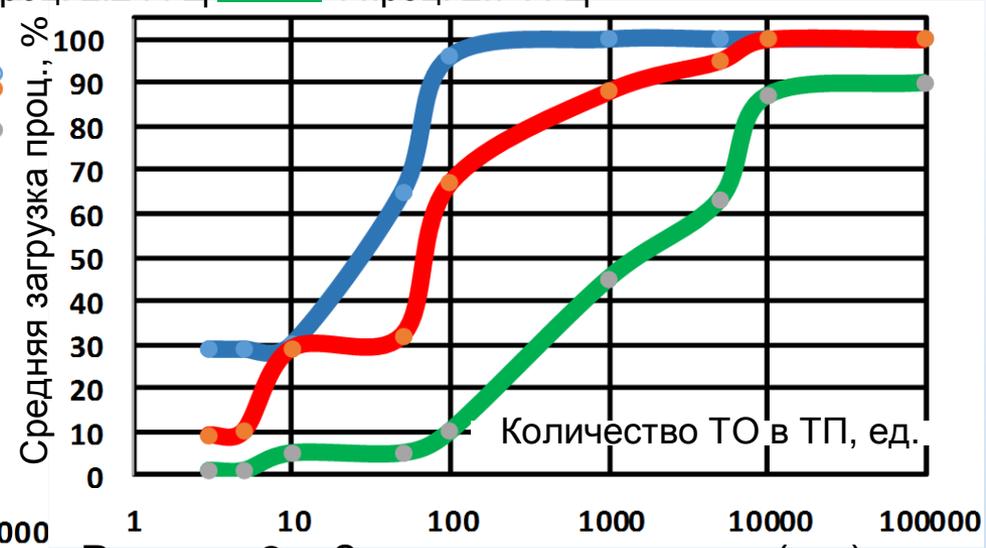
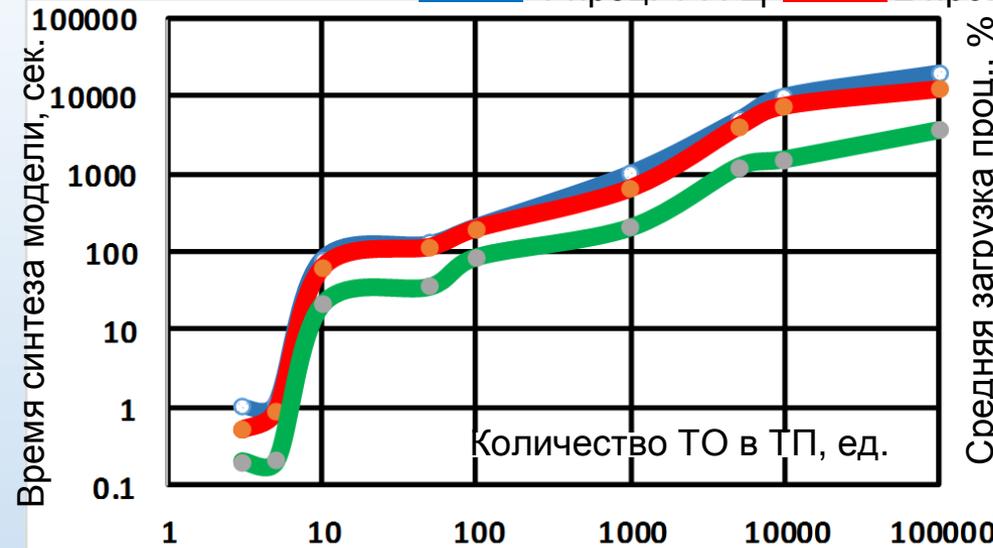


Рисунок 1 – Время синтеза модели ТП в зависимости от количества ТО

Рисунок 2 – Загрузка процессора (-ов) при синтезе модели ТП в зависимости от количества ТО

5000 ТО 1500 ТО 500 ТО 100 ТО

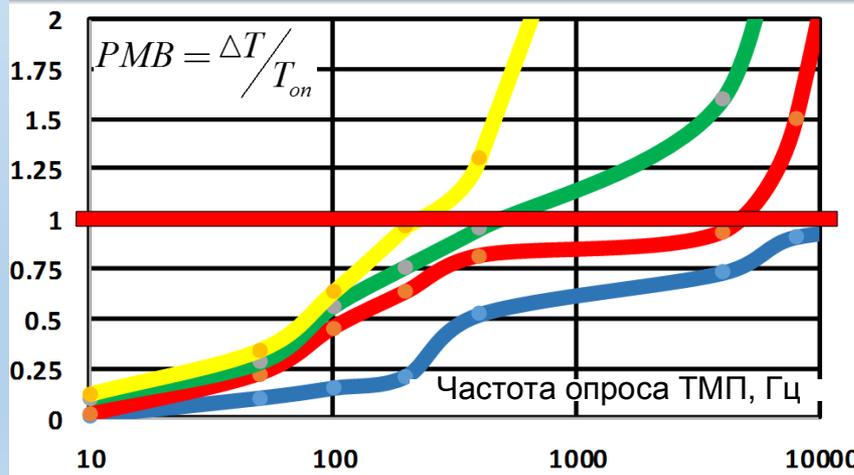


Рисунок 4 – Выполнение требования PMB в зависимости частоты опроса ТМП

ΔT - длительность интервала между формированием входной и выходной разметок всех ТО
 T_{on} - период опроса ТМП

Практическая значимость применения СЛП

1. Сокращение количества видов СПО, применяемого при подготовке и пуске РН, а также комплексном анализе результатов применения КСр за счет расширения моделирующей мощности СПО, вновь создаваемого на основе структурно-логического подхода.
2. Повышение достоверности принимаемых решений по процессами испытаний и применения КСр за счет обеспечения возможности прогнозирования развития процессов в условиях воздействия различных возмущающих факторов.
3. Уменьшение затрат и времени на коррекцию СПО при изменении структуры и логики технологических процессов испытаний и применения КСр за счет обеспечения объектно-ориентированного подхода к моделированию процессов, не требующего участия представителей промышленности со специальной подготовкой.
4. **Применение информационной технологии мониторинга процессов подготовки и пуска РН Союз-2 на основе СЛП позволит повысить качество мониторинга на 30 %.**

- 1. Комплекс моделей** (универсальная модель технологической операции, модель технологического процесса на основе композиции моделей технологических операций и модель ограничений процесса на основе предикатных переходов z-позиций). Модель операции представляет собой примитив конструктора модели процесса и отличается совокупностью компонентов инструмента моделирования сетей Петри, позволяющей осуществлять управление операцией, получать информацию о текущем состоянии операции. Модель технологического процесса отличается возможностью моделирования сложных (в многоаспектном понимании) процессов, объектно-ориентированным и декларативным подходом к моделированию, модель ограничений процесса отличается введением новых элементов инструмента сетей Петри, позволяющих обрабатывать и анализировать ТМИ.
- 2. Метод синтеза модели технологического процесса**, основанный на отображении спецификации технологического процесса в элементы разработанной модели процесса, отличающийся адаптацией к представлению исходных данных в виде рекурсивных функций (таблиц хронометража, сетевых графиков, диаграмм Гантта), включающий **методику проверки адекватности и верификации модели технологического процесса**, обеспечивающую установление соответствия модели технологического процесса его спецификации и отсутствие ошибок в синтезированной модели процесса.
- 3. Метод оптимизации технологического процесса на основе динамического программирования по структурно-логическому подходу**, заключающийся в теоретическом приложении принципа оптимальности Беллмана. Метод отличается новым представлением элементов уравнения Беллмана в виде функций от разметок входных и выходных позиций модели операции.
- 4. Метод уменьшения вычислительной ресурсоемкости реализации структурно-логического подхода**, заключающийся в модификации сетевой структуры операции с целью оптимизации количества смен разметки в единицу времени. Метод отличается новым приложением подходов к оптимизации сетей Петри, а также учетом характеристик технологического процесса при выборе конкретного подхода.
- 5. Метод автоматизированного мониторинга технологического процесса испытаний и применения ракеты-носителя Союз-2** на основе структурно-логического подхода, отличающийся полным охватом технологических операций предстартовой подготовки и пуска РН (функционирование систем РН), а также обработки и анализа телеметрической информации.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Новизна разработанного структурно-логического подхода заключается в его отличиях от существующих подходов к моделированию и мониторингу технологических процессов в предметной области, а именно:

- в адаптации к необходимости учета разнородной исходной информации;
- в адаптации к разнородным видам контроля процессов: событийным, временным, при этом возможно совмещение в одной модели разнородных процессов;
- в разработке для подхода формальных процедур проверки адекватности и верификации;
- в применении агентного принципа в основе СЛП, что, в дальнейшем, значительно повышает качественные характеристики практической реализации.

Спасибо за внимание!
Доклад окончен.