

# Вычислительная ресурсоемкость сетевой модели обработки и анализа измерительной информации ракеты-носителя «Союз-2»

## Computational resource consumption of measurement data processing and analysis network model for “Soyuz-2” carrier rocket

**Шмелев / Shmelev V.**

Валентин Валерьевич

(valja1978@yandex.ru)

кандидат технических наук.

ФГКВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА им. А. Ф. Можайского),

докторант кафедры технологий и средств

комплексной обработки и передачи информации в АСУ (войсками).

г. Санкт-Петербург

**Мануйлов / Manuylov Y.**

Юрий Сергеевич

(kotmanof@rambler.ru)

доктор технических наук, профессор,

почетный работник науки и техники РФ.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

профессор кафедры автоматизированных систем управления космических комплексов.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** космические средства – space facilities; измерительная информация – measurement data; сети Петри – Petri nets; технологический процесс – technological process; вычислительная ресурсоемкость – computational resource consumption.

Объектом рассмотрения является сетевая модель технологического процесса (ТП), построенная на принципах сетей Петри. Формулируется определение свойства вычислительной ресурсоемкости моделирования ТП. На примере процесса обработки измерительной информации ракеты-носителя «Союз-2» показывается значимость учета вычислительной ресурсоемкости моделирования ТП. Рассматривается несколько способов уменьшения вычислительной ресурсоемкости сетевой модели ТП. Приводятся практические расчеты.

Subject to consider is technological process (TP) network model constructed according to principles of Petri nets. Definition of TP modeling computational resource consumption property is stated. “Soyuz-2” carrier rocket measurement information processing procedure serves as an example to show importance of metering the TP modeling computational resource consumption. Several ways to reduce the TP model computational resource consumption are considered. Practical calculations are presented.

### Введение

Современное развитие информационных технологий позволяет реализовать на практике концепцию Единого информационного пространства, в том числе и в такой технически и организационно сложной области

деятельности человека, как космическая деятельность [1]. Одной из проблем, подлежащих решению, является отсутствие единых принципов моделирования ТП функционирования космических средств (КСр) и, как следствие, возможностей управления такими процессами из единого центра (пункта).

В работе [2] описан подход к моделированию технологических процессов на основе модифицированных сетей Петри [3, 4]. Предложена «Универсальная схема технологической операции» (УСТО) – модель технологической операции (ТО). Использование УСТО предполагает моделирование каждой операции ТП сетью Петри из 37 элементов (позиций и переходов). Сложные, объемные ТП функционирования КСр, обработки и анализа их информации могут содержать тысячи и десятки тысяч операций. Поэтому целесообразно предложить способы уменьшения вычислительной ресурсоемкости применения предложенной модели.

### Универсальная схема технологической операции

Достоинством предложенного в работе [2] подхода к моделированию ТП является универсальность схемы ТО. Свойство универсальности схемы ТО заключается в ее адаптации к реализации условных операций, невременного контроля, вложенности и иерархичности структуры всего ТП.

По причине универсальности схемы ТО, совокупность элементов сети Петри, за исключением входных и выходных позиций, может быть заменена специальным переходом-процедурой, который и является, по сути, УСТО. Схема обобщения ТО приведена на рис. 1. Переход-процедура УСТО обозначен прямоуголь-

ником с двойными линиями. В левой части приведены входные позиции, формирующие траекторию развития ТО. В правой части приведены 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. Вместо громоздкого объема внутренних позиций и переходов схемы модели ТП (смотри схему сети Петри в работе [2]) используется упрощенное изображение перехода-процедуры.

В позиции «Старт», «Стоп», «Приостановка» и «Продолжение» поступают управляющие сигналы. Получение фишек данными позициями приводит к началу выполнения ТО («Старт»), к окончанию выполнения ТО («Стоп»), к временной приостановке («Приостановка») и продолжению выполнения ТО («Продолжение»). Данные позиции обеспечивают выполнение требования управляемости модели ТП. Позиция «ОС» (отсчет событий) содержит информацию о наступлении очередного элементарного события, используемого в качестве «счетчика» степени выполнения ТО. В качестве элементарных событий могут использоваться как временные метки, так и события невременного характера, например результаты телеизмерений систем КСр.

Позиции «ИндЗадНач» (индикация значения задержки начала выполнения ТО), «ИндНач» (индикация непосредственного начала выполнения ТО), «ИндВып» (индикация значения степени выполнения ТО), «ИндЗадКон» (индикация значения задержки окончания выполнения

ТО) и «ИндКон» (индикация факта окончания выполнения ТО) являются индикаторными и обеспечивают наблюдаемость модели ТО. Индикаторные позиции «ИндЗадНач», «ИндВып» и «ИндЗадКон» являются счетными, т.к. содержат количество отсчетов событий, полученных за интервал отсчета, соответственно, задержки начала выполнения, непосредственного выполнения и задержки окончания выполнения операции. Позиции «ИндНач» и «ИндКон» являются бинарными и «сигнализируют» о фактах, соответственно, начала и окончания выполнения операции.

### Обоснование необходимости выбора «существенных» отсчетов событий в технологическом процессе обработки и анализа измерительной информации ракеты-носителя «Союз-2»

Применение сетей Петри обусловлено необходимостью моделирования асинхронных параллельных процессов [4]. Основными достоинствами данного аппарата считается возможность организации параллельных потоков информации, учёта причинно-следственных взаимосвязей событий, моделирования процессов без учета их временных характеристик. Недостатками сетей Петри считаются отсутствие интуитивной понятности графического отображения, громоздкость диаграмм при описании сложных процессов. Отмеченные [4] положительные и отрицательные стороны сетей Петри проявляются в достаточной степени в предметной области информационного обеспечения производства, испытаний и применения КСр. Известны примеры успешного приме-

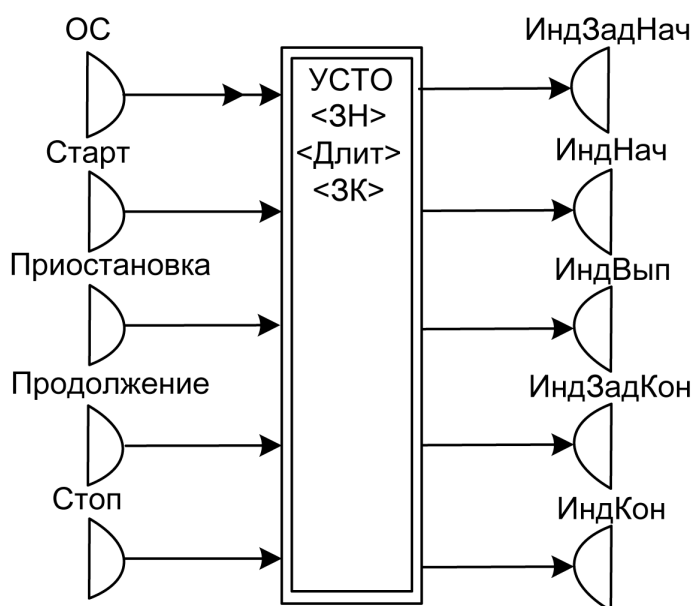


Рис. 1. Обобщенная схема операции

нения модифицированных сетей Петри для моделирования процессов обработки и анализа измерительной информации КСр [5, 6]. Однако в указанных работах моделировался ограниченный круг задач послеполетной обработки и анализа измерительной информации КСр.

Сложность процессов не только обработки и анализа информации, но и функционирования КСр позволяет предположить значительную вычислительную сложность моделирования таких процессов. Под вычислительной сложностью моделирования понимается зависимость объёма вычислительных действий от размера входных данных [7]. Для оценивания вычислительной сложности применения УСТО для моделирования ТП применим следующий подход. Универсальная схема ТО содержит 37 элементов (позиций и переходов) [2]. Один элемент сети Петри требует использования одной переменной, т.е. одного оператора изменения и хранения ее значения. Таким образом, вычислительная сложность моделирования ТП с помощью УСТО будет равна произведению количества ТО и количества используемых элементов-переменных в модели одной ТО.

Применение подхода [2] к моделированию процессов подготовки к пуску, пуска ракеты-носителя «Союз-2», послеполетных обработки и анализа измерительной информации приведет к решению задачи следующей вычислительной сложности. Общее количество операций в ТП подготовки к пуску приблизительно равно 10000 элементарных неделимых операций. Послеполетная обработка измерительной информации составляет процесс, состоящий из, примерно, 2000 операций. Анализ измерительной информации можно считать процессом, состоящим из моделирования порядка 30 тыс. операций выполнения задач системами носителя.

Таким образом, общее количество операций, моделируемых при подготовке, пуске и послеполетной обработке и анализе информации РН, составляет величину порядка 43 тыс. операций. Тогда вычислительная сложность моделирования процесса подготовки и пуска РН «Союз-2», обработки и анализа результатов телеизмерений РН составляет величину 1,72 млн. операций.

Однако вычислительная сложность не является однозначным показателем трудности реализации модели того или иного ТП. Особое значение имеет временная сложность моделирования [7], которая представляет собой длительность проведения вычислительных действий в соответствии с размерностью входных данных. При решении задач в масштабе реального времени или близком к такому масштабу целесообразно рассматривать производную от временной сложности моделирования, определяемую вводимой в данной работе вычислительной ресурсоемкостью применения УСТО, под которой понимается количество смен значений переменных в единицу времени.

Вычислительная ресурсоемкость моделирования процесса испытания, функционирования, обработки и анализа информации КСр может быть определена по значению частоты опроса телеметрических датчиков

системой измерений. Для ракеты «Союз-2» она составляет величину в 200 Гц при измерении медленноменяющихся параметров и 8кГц – при измерении быстроменяющихся параметров. Таким образом, вычислительная ресурсоемкость моделирования процесса функционирования РН «Союз-2» может быть оценена величиной в 344 млн смен значений переменных в секунду при измерении медленноменяющихся параметров и в 13,76 млрд при измерении быстроменяющихся параметров. Поэтому несомненна актуальность решаемой в статье задачи уменьшения вычислительной ресурсоемкости моделирования процессов функционирования КСр и обработки их информации.

### Постановка задачи по выбору «существенных» отсчетов событий

Содержательно рассматриваемая задача формулируется следующим образом. Требуется среди поступающих на вход УСТО (в позицию «ОС» рис. 1) фишек или зарегистрированных событий в ТП выбрать только те, которые обеспечат максимальное снижение вычислительной ресурсоемкости его моделирования при сохранении удовлетворительной степени соответствия состояния модели ТП состоянию моделируемого процесса.

Критерий выбора можем записать в обобщенной форме:

$$OS_{opt} = \arg \min_{U \in U_{\Delta}} \{R(OS, S, U, X, X_f)\}. \quad (1)$$

где  $OS_{opt}$  является оптимальным набором отсчетов событий, являющимся аргументом, минимизирующим показатель  $R(OS, S, U, X, X_f)$  на области (множестве)  $U_{\Delta}$  допустимых альтернатив управления  $U$  моделью операции  $S$ ;  $X, X_f$  – текущее и требуемое (финальное) состояние операции  $S$ . В рамках модели [2]  $OS_{opt}$  представляет собой последовательность «существенных» отсчетов событий,  $OS$  – последовательность всех фишек, поступающих на вход «ОС» УСТО  $S$ ,  $S$  – структура УСТО,  $U$  – последовательность управляющих фишек, поступающих на вход УСТО  $S$ ,  $X$  – текущее количество фишек в выходных (индикаторных) позициях УСТО  $S$ ,  $X_f$  – требуемое количество фишек в выходных позициях УСТО  $S$ .  $R(OS, S, U, X, X_f)$  – функция вычислительной ресурсоемкости моделирования ТП.

### Модель универсальной схемы технологической операции

С позиций теоретико-множественного подхода к описанию математических моделей, модель операции, приведенную в работе [2], как сеть Петри можно описать следующими множествами:

$P = \{P_{вн}, P_{ин}, P_{оут}\} = \{p_i | i \in I_P\}$  – конечное непустое множество позиций сети Петри  $S$ ,  $I_P$  – множество номеров позиций сети,  $P_{вн}, P_{ин}, P_{оут}$  – множества, соответственно, внутренних, входных и выходных позиций сети;

$T = \{t_j | j \in I_T\}$  – 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  $N$ ;

$B: P \times T \rightarrow N$  – входная функция инцидентности, описывающая сбрасывающую дугу от позиции  $t_j$  к переходу  $p_i$  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  $S$  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  $N$ ;

$M: P \rightarrow N$  – функция разметки, которая каждому элементу  $p_i \in P$  ставит в соответствие элемент множества целых неотрицательных чисел  $N$ .

Таким образом, сеть Петри можно описать следующей теоретико-множественной моделью:

$$S = \{P, T, F, B, H^+, H^-, M\}. \quad (2)$$

### Расстановка приоритета переходов

Для выбора «существенных» отсчетов событий в моделируемой ТО предлагается рассмотреть подход, заключающийся в расстановке приоритета переходов в УСТО. Использование расстановки приоритета переходов в сети предполагает дополнение модели (2) функцией  $W: T \times T \rightarrow R$ .  $W$  – функция, ставящая в соответствие каждому элементу  $t_j$  элемент множества вещественных чисел  $R$ , характеризующий степень приоритетности данного элемента по сравнению с другими элементами. Тогда модель сети Петри может быть представлена в следующем виде:

$$S = \{P, T, F, B, H^+, H^-, M, W\}. \quad (3)$$

В рамках модели (3) разрешение для срабатывания перехода  $t_j$  задается неравенством:

$$m(p_i) \geq (f(\langle p_i, t_j \rangle) + b(\langle p_i, t_j \rangle)), \quad (4)$$

где  $m(p_i)$  – значение функции разметки  $M: P \rightarrow N$  для позиции  $p_i \in P, i \in I_P$ ;  $f(\langle p_i, t_j \rangle)$  – значение функции инцидентности  $F: P \times T \rightarrow N$  между элементами  $p_i \in P$  и  $t_j \in T, i \in I_P, j \in I_T$  или кратность дуг от позиции  $p_i$  к переходу  $t_j$ ;  $b(\langle p_i, t_j \rangle)$  – значение функции инцидентности  $B: P \times T \rightarrow N$  между элементами  $p_i \in P$  и  $t_j \in T, i \in I_P, j \in I_T$ ,

или значение функции  $b(\langle p_i, t_j \rangle) = 1$  при наличии сбрасывающей дуги от позиции  $p_i$  к переходу  $t_j$ .

Первым вариантом конфликтной ситуации является следующая модификация выражения:

$$\begin{aligned} & (m(p_i) \geq (f(\langle p_i, t_j \rangle) + b(\langle p_i, t_j \rangle))) \& \\ & \& (m(p_i) \geq (f(\langle p_i, t_k \rangle) + b(\langle p_i, t_k \rangle))), \\ & j \neq k; i \in I_P; j, k \in I_T. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражение (5) означает, что маркировка позиции  $p_i$  одновременно разрешает срабатывание переходов  $t_j$  и  $t_k$ . Наиболее общим вариантом конфликтной ситуации (вторым вариантом) является следующая модификация выражения (4):

$$\begin{aligned} & (m(p_i) \geq (f(\langle p_i, t_j \rangle) + b(\langle p_i, t_j \rangle))) \& \\ & \& (m(p_k) \geq (f(\langle p_k, t_l \rangle) + b(\langle p_k, t_l \rangle))), \\ & i \neq k; j \neq l; i, k \in I_P; j, l \in I_T. \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение (6) формализует маркировку сети, при которой одновременно разрешены для срабатывания более одного перехода. Выражения (5–6) могут быть распространены на случай конфликта более двух переходов и позиций соответствующим увеличением количества аргументов в выражениях.

Для разрешения конфликтных ситуаций с помощью расстановки приоритета перехода используется функция  $W: T \times T \rightarrow R$ . Значением функции является вещественное число, сопоставляющее каждому переходу  $t_j$  сети его приоритет  $w_j$ . При условии, что  $w_j \neq w_l, j \neq l, j, l \in I_T$ , оба варианта конфликтных ситуаций разрешаются в пользу перехода  $t_j$  по сравнению с переходом  $t_l$  в случае  $w_j > w_l$ .

Применительно к рассматриваемой задаче уменьшения вычислительной ресурсоемкости процедуры моделирования ТП с помощью УСТО подход расстановки приоритетов переходов может реализовываться в трех вариантах:

1. Расстановка приоритета в зависимости от функции выхода перехода.
2. Выбор существенного отсчета в зависимости от его информационного содержания.
3. Запрет на прием новых отсчетов события до момента срабатывания всех разрешенных переходов сети.

Основанием для ранжирования в первом варианте является значимость перехода для степени адекватности состояния сети состоянию моделируемой ТО. Поэтому переходы, изменяющие состояние индикаторных позиций, должны получить более высокий приоритет, чем остальные переходы. Первый вариант определения приоритета перехода позволит снизить вычислительную ресурсоемкость благодаря «запрету» на выполнение переходов, не приоритетных в данный момент времени. Вычислительную ресурсоемкость

рассматриваемой сети Петри можно оценить по следующей формуле:

$$R = \frac{|I_T| + |I_P|}{T_{oc}}, \quad (7)$$

где  $T_{oc}$  – период поступления меток «ОС» смены состояния ТО в одноименные позиции, символ  $|\dots|$  означает мощность множества.

С учетом  $|I_P| = |P_{in}| + |P_{вн}| + |P_{out}|$  оценивать вычислительную ресурсоемкость моделирования ТО следует по формуле:

$$R = \frac{|I_T| + |P_{in}| + |P_{вн}| + |P_{out}|}{T_{oc}} + \frac{|P_{out}|}{T_{инд}}, \quad (8)$$

где  $T_{инд}$  – минимальное время, необходимое для различения моментов смены состояния моделируемой ТО.

Оценить величину  $R$  можно для процесса обработки информации РН «Союз-2». Период  $T_{oc}$  поступления меток смены состояния ТО составляет интервал длительностью 0,005 сек. По требованиям эргономики [8] минимально допустимым значением времени  $T_{инд}$  является величина в 0,5 сек. Тогда уменьшение вычислительной ресурсоемкости составит величину порядка 1,2 раза (с 7400 до 6400 изменений переменных в сек. для модели одной ТО).

Рассмотрим второй вариант, пояснения к которому представлены на рис. 2. Для реализации процесса формирования «существенных» фишек в позиции «ОСсущ» (отсчеты события существенные) по их информационному содержанию  $|OC|$  используется предикатный переход «ВыбСущОС» (выбор существенных отсчетов событий). Это такой переход  $t_j | j \in I_T$ , для срабатывания которого необходимыми условиями являются не только выполнение неравенства  $m(p_i) \geq (f(< p_i, t_j >) + b(< p_i, t_j >))$ ,  $i \in I_P$ , но и истинность предикатного выражения  $Pr(|OC|, Gr)$ . Символом  $|OC|$  обозначается информационное содержание метки смены состояния моделируемой ТО,  $Gr$  – аргумент выражения.

Предикатное выражение  $Pr(|OC|, Gr)$  содержит произвольную логическую функцию от аргументов  $|OC|$  и  $Gr$ . Примером такой функции при моделировании событийного невременного процесса является следующая функция:

$$Pr(|OC|, Gr) : (|OC| \geq Gr). \quad (9)$$

При моделировании временного процесса предикатное выражение примет вид:

$$Pr(|OC|, Gr) : ((|OC|(tm_{тек}) - |OC|(tm_{сущ})) \geq Gr), \quad (10)$$

где  $|OC|(tm_{тек})$  – значение принятой фишки «ОС», последней, на текущий момент времени  $t_{тек}$ ;  $|OC|(tm_{сущ})$  – значение фишки «ОС» на момент времени  $t_{сущ}$ , последней использованной для изменения модели ТО.

Множество переходов  $T = \{t_j | j \in I_T\}$  следует разделить на два подтипа: классические переходы  $T_{кл} = \{t_j | j \in I_{T_{кл}}\}$  и предикатные переходы  $T_{пр} = \{t_j | j \in I_{T_{пр}}\}$ , причем  $|I_T| = |I_{T_{кл}}| + |I_{T_{пр}}|$ . Тогда модель (3) будет преобразована к виду:

$$S = \{P, T, F, B, H^+, H^-, M, W, Pr\}, \quad (11)$$

где  $T = \{T, T_{пр}\} = \{t_j | j \in I_{T_{кл}}, t_j | j \in I_{T_{пр}}\}$ ,  $I_{T_{кл}} + I_{T_{пр}} = I_T$  – конечное непустое множество переходов сети Петри  $S$ ;  $Pr = \{pr(t_j) | t_j \in T_{пр}, j \in I_{T_{пр}}\}$  – конечное множество предикатных выражений для предикатных переходов сети Петри  $S$ .

Количественная оценка степени уменьшения вычислительной ресурсоемкости при введении в модель ТО предикатного перехода рассчитывается для случая моделирование временной ТО:

$$R = \frac{|I_T^{доп}| + |I_P^{доп}| + 1}{T_{oc}} + \frac{|I_T| + (|I_P| - 1)}{Gr}, \quad (12)$$

где:  $|I_T^{доп}|$  – количество «дополнительных» переходов (в данном случае это один переход «ВыбСущОС»);  $|I_P^{доп}|$  – количество «дополнительных» позиций (в данном случае это одна позиция «ОСсущ»);  $Gr$  – «шаг» прореживания временных меток смены состояния моделируемой ТО. Единица в первом слагаемом обозначает входную позицию «ОС», которая будет иметь неизменную периодичность изменения состояния. Соответственно, во втором слагаемом в числителе эта же единица вычитается из общего числа позиций схемы модели ТО.

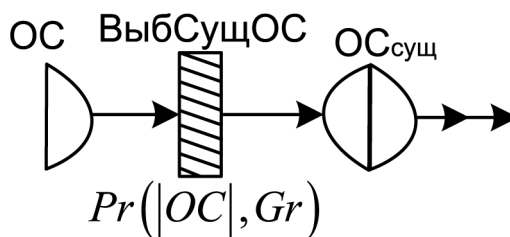


Рис. 2. Формирование существенных фишек по их информационному содержанию

Для рассматриваемого примера обработки информации РН «Союз-2» и  $Gr = 0,5$  сек. вычислительная ресурсоемкость моделирования ТО по формуле (12) составит величину 672 изменений переменных в сек. для одной модели ТО. Таким образом, уменьшение вычислительной ресурсоемкости составит примерно 11 раз.

Рассмотрим третий вариант. С целью адаптации инструмента моделирования систем и процессов с помощью сетей Петри к особенностям практического применения разрабатываются различные модификации сетевых моделей. Одной из подобных модификаций является введение временных переходов [3]. Временными переходами являются переходы, на выходе которых процесс формирования фишек является конечным по длительности процессом. Математическая модель такой сети Петри по сравнению с моделью (11) дополняется множеством  $Tm$ :

$$S = \{P, T, F, B, H^+, H^-, M, W, Pr, Tm\}, \quad (13)$$

где  $Tm$  – функция, ставящая в соответствие каждому переходу  $t_j$ ,  $j \in I_T$ , элемент множества неотрицательных рациональных чисел  $R$ ,  $t_{mj}$  – временная длительность от момента выполнения входной функции инцидентности  $F: P \times T \rightarrow N$  или  $B: P \times T \rightarrow N$  до момента выполнения выходной функции инцидентности  $H^+: T \times P \rightarrow N$  или  $H^-: T \times P \rightarrow N$  переходом  $t_j$ ,  $j \in I_T$ .

В рассматриваемой модели ТО использование такой модификации оправдано по следующей причине. Предназначение индикаторных позиций заключается в необходимости придания модели ТО свойства наблюдаемости как динамической системы [7]. Это означает, что информация в таких позициях используется для определения текущего состояния модели ТО. В дальнейшем информация о текущем состоянии модели ТО используется для контроля и управления ТО. На практике совокупность задач наблюдения, контроля и выработки управляющего воздействия является конечным по времени процессом. Поэтому обновление информации в индикаторных позициях до окончания этого процесса нецелесообразно, так как в этом случае

возникает запаздывание в формировании управляющих воздействий относительно меняющегося состояния модели ТО.

На рис. 3 представлена связь относительно индикаторной позиции «ИндЗадНач». Для охвата связью остальных индикаторных позиций необходимо построить аналогичную совокупность элементов и для них. На рис. 3 представлены:

- переход «x2», умножающий количество фишек в позиции «ИндЗадНач»,
- позиция «ИндЗадНач2», предназначенная для индикации текущей длительности задержки начала выполнения ТО,
- позиция «ОСсуц», содержащая фишку после окончания формирования информации в индикаторной позиции «ИндЗадНач»,
- переход «ВыборСуцОС», формирующий фишку при одновременном поступлении отсчета события моделируемой ТО в позицию «ОС» и формировании информации в индикаторной позиции «ИндЗадНач»,
- позиция «ОСсуц2», содержащая фишку, которая будет обработана схемой модели ТО.

Значение функции  $Tm$  для каждого перехода  $t_j$ ,  $j \in I_T$ , будет изменяющимся и зависящим от времени отработки предыдущего отсчета события моделируемой ТО. При этом ресурсоемкость будет рассчитываться по формуле:

$$R = \frac{|I_T^{\text{доп}}| + 1}{T_{\text{ОС}}} + \frac{|I_T| + (|I_P| - 1) + |I_T^{\text{доп}2}| + |I_P^{\text{доп}2}|}{Gr}, \quad (14)$$

где:  $|I_T^{\text{доп}}|$  – количество «дополнительных» переходов типа 1 (в данном случае это один переход «ВыбСуцОС»);  $|I_T^{\text{доп}2}|$  – количество «дополнительных» переходов типа 2 (в данном случае это один переход «x2»);  $|I_P^{\text{доп}2}|$  – количество «дополнительных» позиций типа 2 (в данном случае это три позиции «ОСсуц», «ОСсуц2» и «ИндЗадНач2»);  $Gr$  – «шаг» прореживания временных меток смены состояния моделируемой ТО ( $Gr$  сек.). В соотношении (14) единица в первом слагаемом обозначает входную позицию «ОС», которая будет иметь неизменную периодичность изменения состояния. Соответственно, во

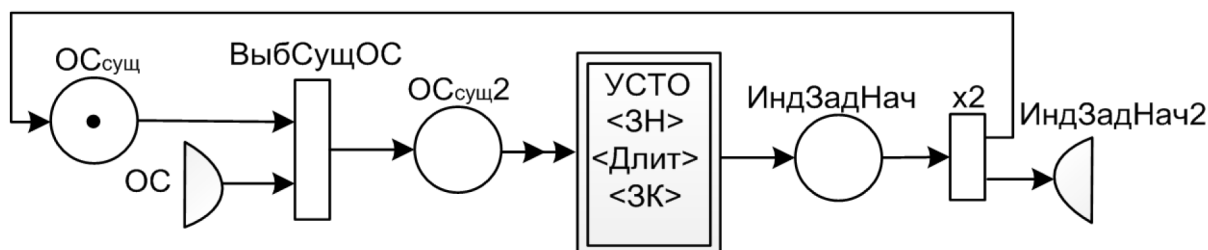


Рис. 3. Схемная реализация обратной связи

втором слагаемом в числителе эта же единица вычитается из общего числа позиций схемы модели ТО.

При обработке информации РН «Союз-2» и  $Gr = 0,5$  сек. вычислительная ресурсоемкость моделирования ТО по формуле (14) составит величину порядка 500 изменений переменных в сек. для одной модели ТО. Таким образом, вычислительная ресурсоемкость уменьшится примерно в 15 раз.

## Заключение

В данной статье: введено понятие вычислительной ресурсоемкости процесса моделирования ТО, обоснована необходимость уменьшения ресурсоемкости на примере моделирования процесса обработки измерительной информации РН «Союз-2», формализована задача уменьшения ресурсоемкости, рассмотрены три варианта решения задачи оптимизации процесса моделирования ТО, получены численные значения показателя качества модели.

Показано, что в качестве наиболее эффективного подхода к уменьшению вычислительной ресурсоемкости моделирования ТП обработки и анализа информации РН «Союз-2» целесообразно выбрать запрет на прием новых отсчетов события до момента срабатывания всех разрешенных переходов сети. Проведенные исследования позволяют утверждать, что в целом использование предлагаемого подхода позволит уменьшить вычислительную ресурсоемкость в 15–20 раз.

## Литература

1. Концепция информатизации Роскосмоса (2010–2015 гг.) [Электронный ресурс] / Федеральное космическое агентство. – Режим доступа: <http://www.federalspace.ru/2158>, свободный. – Загл. с экрана.
2. Шмелев, В. В. Модели технологических процессов функционирования космических средств / В.В. Шмелев // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 78–93.
3. Котов, В. Е. Сети Петри / В.Е. Котов. – М: Наука, 1984. – 160 с.
4. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон; пер. с англ. М.В. Горбатовой [и др.]. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
5. Актуальные вопросы автоматизированной обработки и анализа информационных процессов : учебное пособие / Ю.П. Рышков [и др.]. – МО РФ, 1992. – 140 с.
6. Теория и практика построения автоматизированных систем мониторинга технического состояния космических средств / Под редакцией О. В. Майдановича. – СПб: ВКА, 2011. – 219 с.
7. Вирт, Н. Алгоритмы и структуры данных / Н. Вирт – СПб.: Невский диалект, 2001 г. – 352 с.
8. ГОСТ Р 52870-2007. Средства отображения информации коллективного пользования. Требования к визуальному отображению информации и способы измерения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 27 с.