

**Многоресурсная сеть Петри для моделирования системы лесозаготовки**

*Улезко Владимир Викторович*

*Филиал ФГБОУ «Национальный исследовательский университет МЭИ» в*

*г. Смоленске*

*магистрант*

*Сеньков Алексей Викторович*

*Филиал ФГБОУ «Национальный исследовательский университет МЭИ» в*

*г. Смоленске*

*доцент*

**Аннотация**

В статье предложена многоресурсная сеть Петри, отличающаяся от существующих наличием возможностей по моделированию систем, работающим с несколькими ресурсами одновременно (топливо, время, пространство и т.д.). Дополнение механизмами учета ресурсов вложенных сетей Петри обеспечивает построение моделей сложных систем, состоящих из нескольких работающих независимо, но взаимодействующих элементов. Показан пример применения многоресурсных сетей Петри для моделирования системы лесозаготовки.

**Ключевые слова:** сети Петри, способ учет ресурсов, модель мультиресурсной сети Петри

**Multi-resource Petri net for modeling the logging system**

*Ulezko Vladimir Viktorovich*

*Branch of «National research University MPEI» in Smolensk*

*master student*

*Senkov Aleksey Victorovich*

*Smolensk branch of NRU MPEI*

*associated professor*

**Abstract**

The article proposes a multi-resource Petri net, which differs from existing access by the positions of the model, which works with several resources simultaneously (fuel, time, space, etc). Adding mechanisms of accounting for resources of embedded networks Petri provides the construction of models of complex systems consisting of several working independently, but interacting elements. An example of the application of multi-resource Petri nets for modeling the logging system is shown.

**Key words:** Petri nets, method of accounting for resources, model of multiresource Petri net

В настоящее время актуальным является вопрос моделирования поведения робототехнических систем, состоящих из нескольких самостоятельно функционирующих роботов с использованием различных подходов. Одним из наиболее широко применяемых подходов к такому моделированию являются сети Петри [4]. Описание сложных организационно-технических систем (СОТС) с использованием классического аппарата сетей Петри получается достаточно «тяжеловесным». При составлении такого описание, эксперт может допустить ошибку, которая «сведет на нет» все результаты моделирования. В [1] для моделирования сложных организационно-технических систем, включающих несколько самостоятельно функционирующих элементов предложен формализм вложенных сетей Петри (ВСП).

Во вложенных сетях фишки в позициях сети сами могут быть сетями Петри. Вложенная сеть состоит из системной сети и элементных сетей, представляющих сетевые фишки. Для лучшего описания рассмотрим простой пример вложенной сети.

На рисунке 1 изображена вложенная сеть Петри. Она состоит из двух сетей: SN – системная сеть и EN – элементная сеть.

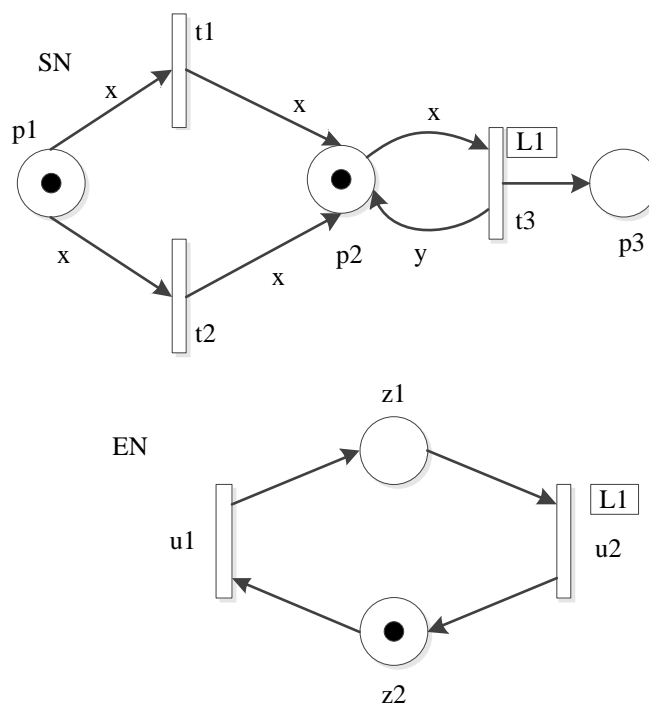


Рисунок 1 – Вложенная сеть Петри

Маркеры, находящиеся в позициях  $p1$  и  $p2$  системной сети (SN) являются сетевыми. Каждый из них описывается элементной сетью EN. Между системной и элементной сетями установлена связи через переход, помеченный  $L1$ . Таким образом определяется вертикальная синхронизация

сетей. Переход, помеченный одинаково в элементной и системной сетях, срабатывает только при наличии условий для его срабатывания одновременно на 2-х уровнях.

Переменные  $x$  и  $y$ , которые приписаны дугам системной сети, передают информацию о начальной разметке элементной сети.

Формализм вложенных сетей Петри обеспечивает достаточно компактное представление СОТС, при этом, в качестве системной сети описываются процедуры взаимодействия элементов системы между собой, а на уровне элементных сетей описывается функционирование каждого из элементов в отдельности. ВСП, при этом, не обеспечивают моделирование системы с учётом потребления ресурсов.

### **Задача моделирования потребления ресурсов на примере лесозаготовительной системы**

Лесозаготовительная система [7] в качестве объектов и субъектов своего функционирования использует различные ресурсы, следовательно распределение ресурсов в такой системе является очень важной составляющей.

Система является динамической исходя из того, что все ее процессы происходят во времени, а также технологические операции требуют незамедлительной обработки и принятия дальнейшего решения.

Основные операции лесозаготовительной системы:

- валка деревьев (сваленное дерево служит дальнейшим объектом работ на лесозаготовительном комплексе);
- трелёвка (деревья, хлысты или сортименты перемещают от места валки к лесопогрузочным пунктам. В состав операции входят следующие технологические элементы: сбор, формирование или пакетирование пачки деревьев, хлыстов или сортиментов, погрузки пачки на машину, транспортировка ее на лесопогрузочный пункт или к месту обработки, разгрузка пачки и обратный ход машины при возвращении на лесосеку);
- очистка деревьев;
- раскряжёвка (поперечное деление стволов деревьев, очищенных от сучьев);
- погрузка древесины;
- вывоз древесины.

Дополнительные операции:

- подготовительные работы – подготовка лесосек, погрузочных пунктов, обустройство производственных участков, выбор трасс усов лесовозных дорог, монтаж оборудования;
- техническое обслуживание (заправка, рабочее состояние машин и так далее).

На рисунке 2 изображен пример, представляющий общий алгоритм работы лесовалочной машины (харвестера). Он создан в качестве

вспомогательного описания системы лесозаготовки для помощи описания исследуемой системы с использованием сетей Петри.

Блок «Начало работы» определяет длительность смены работника и отвечает за использование харвестера.

В блоке «Время смены работника» храниться количественная длительность смены.

В блоке «Операции древесной переработки» объединены несколько действий выполняемых харвестером.

Блок «Движение к месту работы» характеризует передвижение машины и количество топлива в ней.

Блок «Проверка топлива в баке» содержит правило оценки топлива в баке машины.

Блок «Заправка баков машины» отвечает за изменение топлива в баке машины.

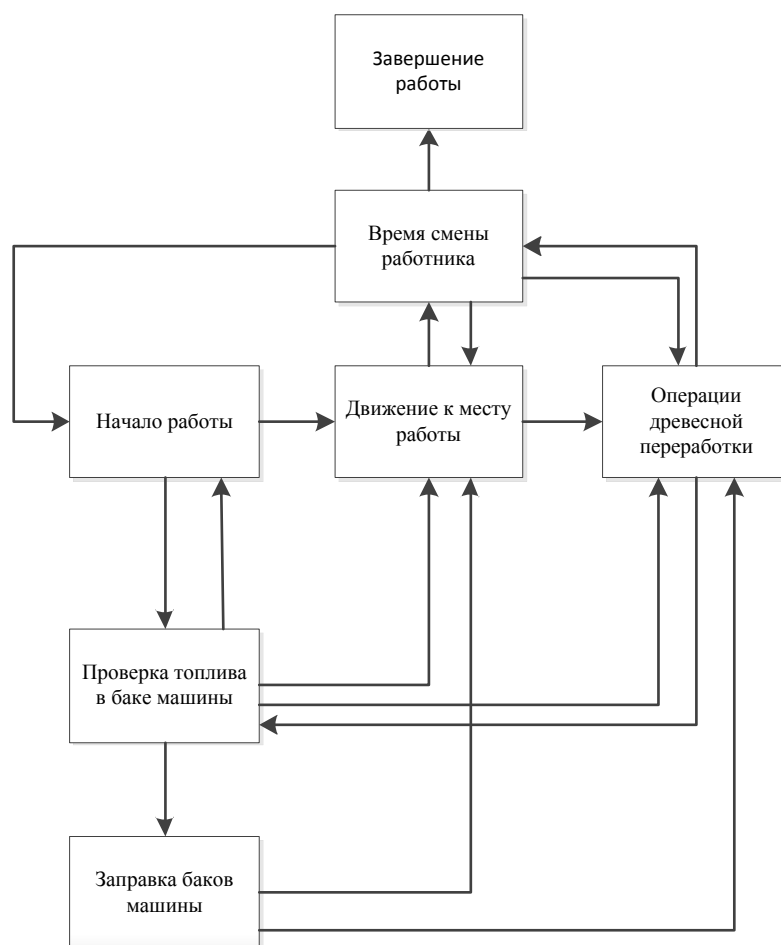


Рисунок 2 – Алгоритм работы лесовалочной машины (харвестера)

На основе требований, которые ставятся перед многоресурсной производственной системой, необходимо так же сформулировать требования к описывающей ее сети Петри. Для конкретизации задачи в качестве примера будет выбрана лесозаготовительная система.

### Нечеткие сети Петри с ресурсами в маркировке

Поскольку в производственных системах реального времени не всегда параметры являются стационарными, а изменяются, следовательно, они обладают неопределенностью. Для описания систем с этой особенностью существуют нечеткие сети Петри (НСП) [2, 3]. Так же исследуемые системы обладают многоресурсностью (МР), которая должна быть учтена в модели создаваемой сети.

Модель сети Петри включает в себя:

1) Механизм работы с нечеткостью. В примере лесозаготовительной системы, нечеткость проявляется в работе с ресурсами. Вся работа с ними осуществляется с позиции нечетких множеств.

2) Ресурсы, содержащиеся в маркировке сети Петри, а именно в фишках, которые ее образуют.

Опишем требования к реализации создаваемой модели:

- каждый переход дополнен функциями потребления и восполнения ресурсов;
- каждая позиция системной сети дополнена функцией потребления временного ресурса;
- каждая позиция описывает состояние системы;
- каждый переход описывает какое-либо действие, происходящее в системе;
- в каждой позиции сети Петри может находиться одновременно только один маркер, из этого следует, что кратность дуг в создаваемой модели равна единице ( $k=1$ ), то есть сеть Петри является безопасной. Такое ограничение необходимо для удобной работы с ресурсами, которые, в таком случае, находятся в определенном количестве маркеров, что упрощает их учет;
- при срабатывании перехода в его выходных позициях не должно содержаться маркеров, потому что сеть является безопасной. Возникновение такой ситуации, когда переход сети Петри не может сработать из-за наличия фишек в выходных позициях, называется «контактом».

### Математическое описание многоресурсной сети Петри

$$C_{\text{new}} = (N, m_0, \lambda, x, fn)$$

$N = (P, T, I, O)$  – структура нечеткой сети Петри, аналогичная ординарной сети Петри, где  $I = \{PxT\} \rightarrow \{0, 1\}$ ;  $O = \{TxP\} \rightarrow \{0, 1\}$ .

$m_0 = (m_1^0 \dots m_n^0)$  – вектор начальной маркировки, каждая компонента которого определяется наличием или отсутствием маркера в позиции.

$\lambda = (\lambda_1 \dots \lambda_n)$  – пространство векторов потребления ресурсов в переходах.

$x = (x_1 \dots x_n)$  – пространство векторов потребления ресурсов в позициях.

$fn = (fn_1 \dots fn_n)$  – кортеж нечетких ресурсов, находящийся в метке МСП.

**P1:** Состояние НСП определяется вектором  $m_0 = (m_1^0 \dots m_n^0)$ , компоненты которого интерпретируются  $(m_i \in 0 \vee m_i \in 1)$  как значения наличия или отсутствия маркера в позиции НСП.

**P2:** Условие активности перехода. Переход является активным, если выполнены следующие условия:  $\min \{fn_i\} \geq \lambda_j$  (в маркере содержится такой объем ресурсов, который не меньше объема ресурсов, потребляемого в активном переходе);

**P3:** Правило срабатывания перехода.

Выполняется правило P2.

Входные позиции:

$$1) \forall p_i \in P \ I(p_i t_k) = 1 : m_i = 0$$

Выходные позиции:

$$\forall p_i \in P \ I(t_k p_j) : m_i = 1$$

Для ресурсов:

Исходя из того, что ресурсы являются нечеткими числами, для осуществления математических операций над ними будем применять принцип нечеткого обобщения Л.Заде.

Входные позиции:

$$\forall p_i \in P \ I(p_i t_k) = 1 : fn'_i = fn_i \tilde{\sim} x_i$$

$$\mu_{fn'_i} = \sup_{fn'_i = fn_i - x_i} (\mu_{fn'_i}(z) \wedge \mu_{x_i}(y))$$

Выходные позиции:  $O(t_k p_j) > 0$ :

$$\forall p_i \in P \ I(p_i t_k) = 1 : fn'_i = fn_i \tilde{\sim} \lambda_i$$

$$\mu_{fn'_i} = \sup_{fn'_i = fn_i - \lambda_i} (\mu_{fn'_i}(z) \wedge \mu_{\lambda_i}(y))$$

$$\forall p_i \in P \ I(p_i t_k) = 1 : fn'_j = fn_j \tilde{\nabla} \lambda_j$$

$$\mu_{fn'_i} = \sup_{fn'_j = fn_j + \lambda_j} (\mu_{fn'_j}(z) \wedge \mu_{\lambda_j}(y))$$

$\tilde{\sim}$  – нечеткая операция, соответствующая операции «-» над обычными числами.

$\tilde{\nabla}$  – нечеткая операция, соответствующая операции «+» над обычными числами.

Опишем применение комбинации ВСП и НСП для моделирования многоресурсной системы на примере системы лесозаготовки. Так же покажем применение механизмов учета ресурсов в такой системе.

На рисунке 3 изображена сеть, которая описывает механизм работы двигателя внутреннего сгорания, который является двигателем харвестера.

p1 – двигатель работает

p2 – двигатель заглушен

t1 – потребление топлива

В данном примере будем учитывать два ресурса, а именно: топливо(P) и пробег двигателя(S). Так же в качестве дополнительного параметра,

помогающего количественно оценить эти ресурсы, используется модельное время ( $t$  - единица времени в системе).

Потребление в  $p1$ : здесь ресурсы не потребляются, только увеличивается модельное время в связи с нахождением системы в этом состоянии.

Потребление в  $p2$ : состояние, служащее для определения окончания работы, ресурсы системы здесь не изменяются.

Потребление в  $t1$ : здесь потребляется ресурс топлива ( $P$ ) за время  $t$ , в свою очередь, пробег двигателя ( $S$ ) растет с увеличением затрат топлива.

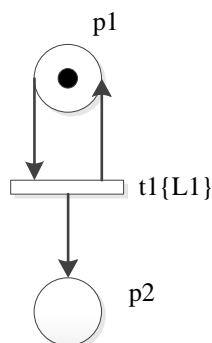


Рисунок 3 – Сеть Петри, иллюстрирующая работу двигателя внутреннего сгорания

На рисунке 4 изображена сеть Петри, описывающая работу заправщика в лесозаготовительной системе.

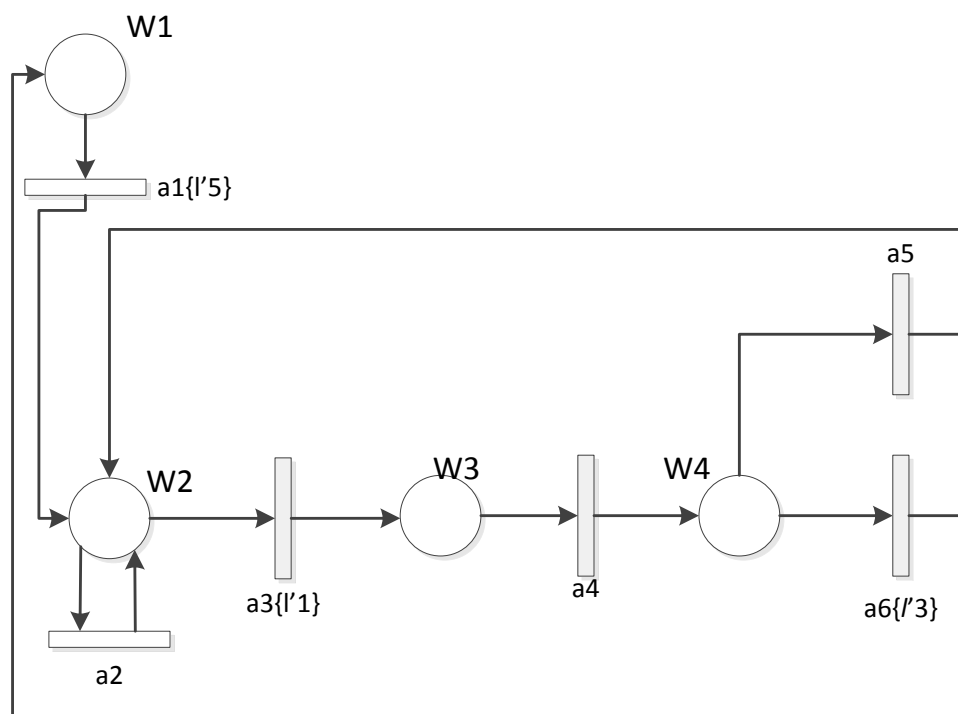


Рисунок 4 – Элементарная сеть работы заправщика

Таблица 1 - Описание элементов сети заправщика

Позиция	Значение	Переход	Значение
W1	заправщик готов к работе	$a1\{1^5\}$	определить местоположение заправщика
W2	место определено	$a2$	движение к месту заправки
W3	топливо передано	$a3\{1^1\}$	передача топлива заправщиком
W4	объем передаваемого топлива определен	$a4$	определение объема передаваемого топлива(сколько его осталось после передач харвестеру)
		$a5$	пополнить ресурсы передаваемого топлива
		$a6\{1^3\}$	переход к дальнейшей работе(топлива достаточно)

На рисунке 5 изображена сеть Петри, реализующая работу харвестера в лесозаготовительной системе.

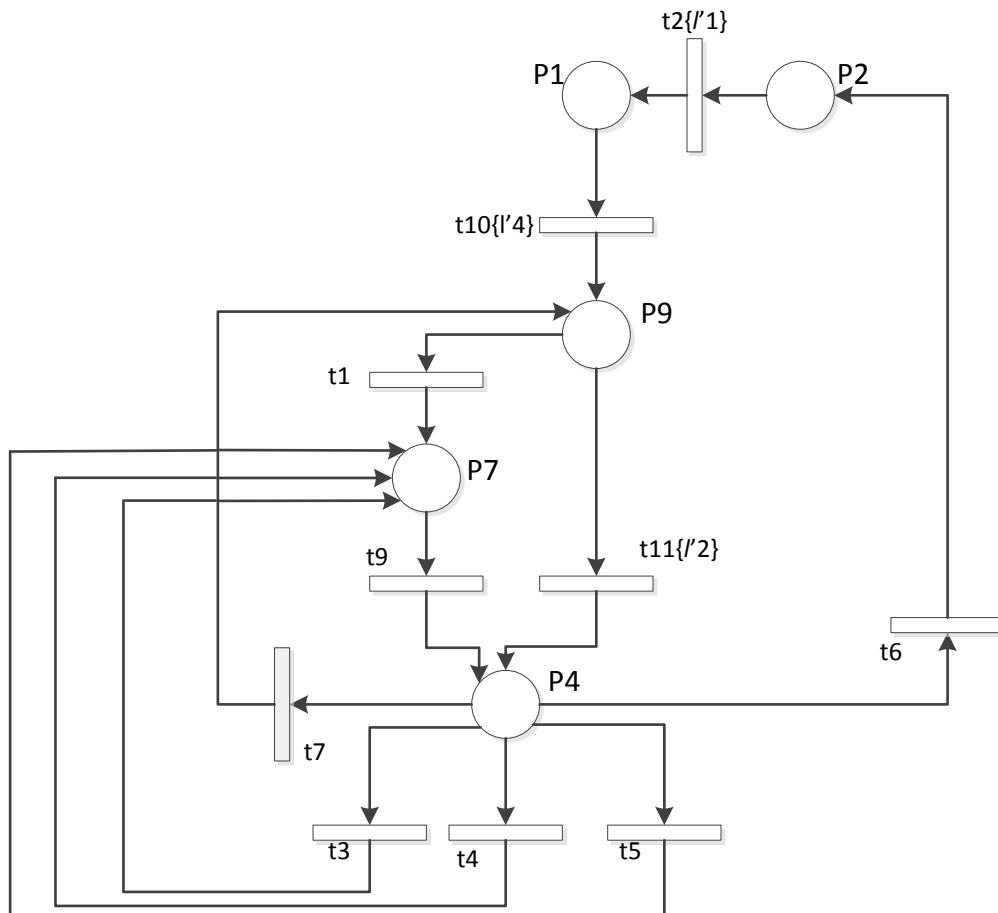


Рисунок 5 – Элементарная сеть работы харвестера



Таблица 2 - Описание элементов сети харвестера

Позиция	Значение	Переход	Значение
P1	харвестеру не нужна заправка	$t1\{1'1\}$	движение харвестера к месту работы
P2	харвестеру нужна заправка	$t2$	заправка харвестера
P4	харвестер свободен	$t3$	выполнение 1й операции
P7	харвестер на месте работы	$t4$	выполнение 2й операции
P9	положение определено	$t5$	выполнение 3й операции
		$t6$	падение уровня топлива ниже определенного предела
		$t7$	движение харвестера к базе для разгрузки
		$t9$	начать работу
		$t10\{1'4\}$	определить местоположение харвестера
		$t11\{1'2\}$	освободить харвестер

На рисунке 6 изображена сеть Петри, которая является общей для системы лесозаготовки[5]. Она объединяет все элементы системы и обеспечивает их совместное функционирование.

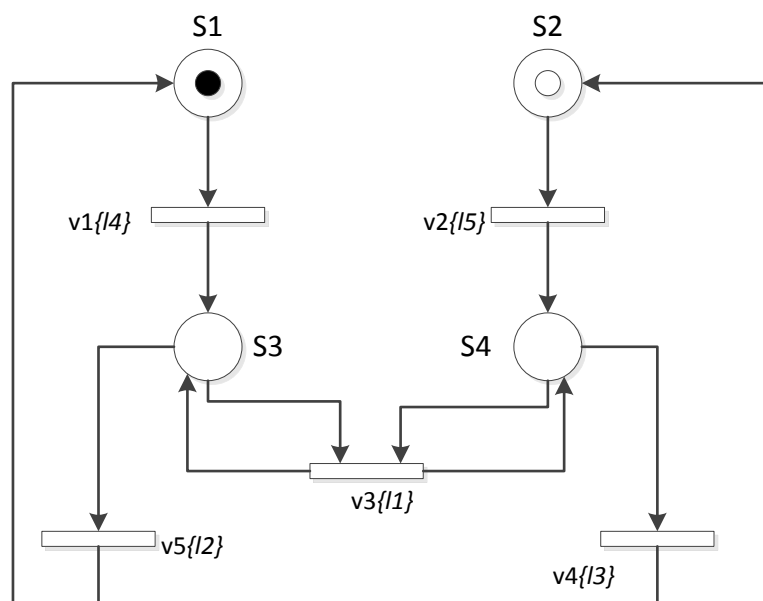


Рисунок 6 – Системная сеть работы лесозаготовительной системы

Таблица 3 - Описание элементов системной сети лесозаготовки.

Позиция	Значение	Переход	Значение
S1	свободный харвестер	$v1\{14\}$	задействовать харвестер
S2	свободный заправщик	$v2\{15\}$	задействовать заправщик
S3	харвестер задействован	$v3\{11\}$	работа системы (заправка)
S4	заправщик задействован	$v4\{13\}$	освободить заправщик
		$v5\{12\}$	освободить харвестер

Система лесозаготовки является многоресурсной, реализация этого свойства очень важна, так как позволяет хорошо проиллюстрировать ее работу. Перечислим ресурсы, входящие в нашу систему: а) временной ресурс; б) топливо в) вместимость харвестера.

Для реализации этой системы выбран механизм ВСП с использованием нечеткости. С помощью вложенных сетей описывают структуру взаимодействия различных частей общей системы лесозаготовки. Нечеткость используется в учете ресурсов (количественные характеристики представлены нечеткими множествами (числами)).

На рисунках 3 и 4 представлены элементные сети, описывающие работу заправщика и харвестера соответственно. Сеть Петри на рисунке 5 является системной. У этой сети две функции: а) служит для общего описания лесозаготовительной системы б) синхронизирует работу элементных сетей.

В созданной модели используется вертикальная синхронизация. Она служит для обеспечения одновременного срабатывания переходов в системной и элементных сетях, и обозначается следующим образом:  $v3\{l1\}$  и  $t2\{l'1\}$ . Где  $v3$  является переходом системной сети, а  $t2$  – элементной.

### Заключение

Предложена многоресурсная сеть Петри, отличающаяся от существующих наличием возможностей по моделированию систем, работающих с несколькими ресурсами одновременно (топливо, время, пространство и т.д.). Дополнение механизмами учета ресурсов вложенных сетей Петри обеспечивает построение моделей сложных систем, состоящих из нескольких работающих независимо, но взаимодействующих элементов. Показан пример применения многоресурсных сетей Петри для моделирования системы лесозаготовки.

### Библиографический список

1. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ систем с распределенной структурой. М.: Научный мир, 2004. 208с.

2. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
3. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.:Горячая линия-Телеком, 2007. 284 с.
4. Котов В.Е. Сети Петри. М.: Наука Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 160с.
5. Моделирование сложных объектов в режиме реального времени на основе сетей Петри, [Электронный ресурс] URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-otscheta-modelnogo-vremeni-pri-imitatsionnom-modelirovanii-raboty-lesozagotovitelnyh-mashin>
6. Производственная система [Электронный ресурс] URL: <http://center-yf.ru/data/Menedzheru/proizvodstvennaya-sistema.php>
7. Имитационное моделирование процессов лесного комплекса [Электронный ресурс] URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2003-uch-posob-guriev-blok-1.pdf>