## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

# Модель территориально-распределённой иерархической автоматизированной системы управления

## Model of a geographically distributed hierarchical automated control system

## Шкорина / Shkorina A.

Александр Васильевич (chiliperec2006@yandex.ru)

ФГКВОУ ВО «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» (ВА РВСН имени Петра Великого) МО РФ, адъюнкт кафедры

информационно-телекоммуникационных систем и сетей, радиоэлектронной и информационной борьбы.

Московская обл., г. Балашиха

Ключевые слова: автоматизированная система управления — automated control system; вероятность доведения информации — probability of information delivery; время доведения информации — time of information delivery; сеть Петри — Petri net; расширения сетей Петри — extensions of Petri nets.

В статье рассмотрен подход к построению на основе теории сетей Петри модели современных сложных территориально-распределённых иерархических автоматизированных систем управления (АСУ), обладающих большим количеством дублирующих узлов и связей, позволяющий определить существующие пути, а также оценить вероятность и время доведения информации до узлов систем в произвольный момент времени при деградации структуры АСУ и изменениях характеристик её элементов.

The article considers an approach to building a model of modern complex geographically distributed hierarchical automated control systems (ACS) based on the theory of Petri nets, which has a large number of duplicating nodes and connections. This approach allows us to determine the existing paths, as well as to estimate the probability and time of bringing information to the nodes of systems at an arbitrary time when the ACS structure is degraded and the characteristics of its elements change.

В современном мире создано большое количество территориально-распределённых иерархических систем, предназначенных для решения задач в самых разных областях деятельности. Для автоматизации процессов управления в таких системах используются автоматизированные системы управления (АСУ), представляющие собой совокупность взаимоувязанных комплексов автоматизированных средств, размещенных в узлах системы. Структура

## Шухардин / Shukhardin A.

Александр Николаевич (alex93.71@mail.ru) кандидат технических наук, доцент. ВА РВСН имени Петра Великого, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и сетей, радиоэлектронной и информационной борьбы.

Московская обл., г. Балашиха

Материалы IV Межведомственной НТК "Проблемы развития и совершенствования АСУ ВН", Санкт-Петербург, ВКА. им. А. Ф. Можайского, 30 октября 2019 г.

такой АСУ зачастую имеет сложный также территориально-распределённый иерархический характер с большим количеством дублирующих узлов и связей. Своевременное решение задачи доведения информации до всех узлов системы в установленные сроки и с требуемым качеством для некоторых систем определяет эффективность функционирования системы в целом. Вместе с тем в период эксплуатации возможно нарушение структуры АСУ, а также свойств структурных элементов АСУ, вследствие чего доведение информации до подчинённых узлов может стать сложной задачей.

Если при анализе вариантов доведения информации до узлов системы оценивать только время, необходимое для этого, а вероятность доведения не учитывать, это может привести к неадекватной оценке возможностей текущего состояния узлов, средств автоматизации и связи и, в конечном итоге, к срыву доведения информации. В связи с этим при анализе вариантов доведения информации до узлов АСУ необходимо учитывать не только время, необходимое для этого, но и вероятность доведения информации.

В связи со сложностью и уникальностью объектов и процессов функционирования современных АСУ проведение натурных экспериментов для определения вероятности и времени доведения информации зачастую невозможно или сопряжено с высокой стоимостью. Возникает задача построения адекватной модели, позволяющей оперативно оценивать вероятность и время доведения информации до узлов системы в произ-

94

вольный момент времени в конкретной сложившейся обстановке (имеющихся структуре АСУ и характеристиках её элементов).

Структура АСУ соответствует иерархии узлов системы, на которых установлены автоматизированные средства АСУ. В соответствии с этой иерархией узлы ранжированы по уровням. В зависимости от информации, передаваемой в АСУ, можно выделить два контура:

контур доведения распорядительной информации - «сверху-вниз»;

контур сбора докладов - «снизу-вверх».

Для решения задачи рассмотрим контур доведения распорядительной информации. Перед построением модели необходимо описать рассматриваемый контур:

- информация, передаваемая в АСУ между узлами системы, условно называется «пакет»;
- пакет формируется источником иерархически «высшим» узлом системы;
- узлы системы, не являющиеся иерархически «низшими», которые могут передавать (ретранслировать) получаемые пакеты по линиям связи, условно называются узлами коммутации (УК);
- иерархически «низшие» узлы системы, которые исполняют и не ретранслируют пакеты, условно называются узлами-исполнителями (УИ);
- пакеты в АСУ передаются между УК на своём иерархическом уровне и на УК более низких иерархических уровней вплоть до УИ.

АСУ структурно представлена совокупностью подсистем, которые в свою очередь представлены совокупностью автоматизированных средств и каналов связи, организованных с их помощью. При наличии необходимых программно-аппаратных средств на УК и (или) полномочий оператора УК, пакет может быть передан в другую подсистему автоматически или оператором.

Необходимо построить модель АСУ, которая позволит оперативно определять множество вариантов (путей) доведения пакета до каждого УИ и для каждого варианта оценивать соответствующие вероятность и время доведения пакета в любой момент времени.

Исходные данные для построения модели АСУ: K – количество УК, задействованных в АСУ,  $K \ge 1$ ;

Q – количество подсистем, организованных в АСУ,  $Q \ge 1$ ;

– количество организованных для доведения пакетов линий связи (ЛС) между пунктами управления в q-ой подсистеме, q = 1, Q;

 $P_{_{\mathrm{VK}}} = \{ p_{_{\mathrm{VK}k}} \mid k = 1, K \}$  — множество значений вероятностей работоспособного состояния УК;

 $T_{
m yk} = \left\{ T_{
m obpk} \mid k = \overline{1,K} 
ight\}$ — множество множеств значений времени обработки пакета перед его передачей по имеющимся подсистемам на УК;

 $T_{\text{обр}k} = \left\{ t_{\text{обр}k,i} \mid i = \overline{1,I_k} \right\}$ — множество значений времени обработки пакета, полученного на k-ом УК, перед его передачей по одной из имеющейся подсистем;

 $I_k$  – количество возможных вариантов обработки пакетов, полученных на k-ом УК, перед их передачей по имеющимся подсистемам;

 $P_{\mathrm{nc}}^q = \left\{ p_{\mathrm{nc}l}^q \mid l = \overline{1, L_q} \right\}$  — множество значений вероят

ностей передачи приказа по ЛС в q-ой подсистеме;  $T_{\rm nc}^q = \left\{t_{\rm ncl}^q \mid l=1, L_q\right\}$  — множество значений времени передачи приказа по ЛС в *q*-ой подсистеме.

В результате проведённого анализа возможных подходов к построению необходимой модели, анализа публикаций в научных изданиях последних лет [1, 2, 3, 4] выявлено, что применение положений теории раскрашенных иерархических сетей Петри позволяет построить такую модель.

В сети Петри, как правило, условия моделируются позициями, а события - переходами. В связи с этим целесообразно УК представить совокупностью позиции у и перехода  $s_{xx}$ , связанных между собой дугой. Позиция представляет собой условие «получен пакет», а переход - событие «передача пакета». Так как на УК происходят не только процессы передачи пакета в пределах одной подсистемы АСУ, но и трансформация пакета для его передачи в другие подсистемы, а также блокировка возникающих циклических путей передачи пакетов, переход УК является составным (является подсетью Петри). Составной переход обозначим прямоугольником (рис. 1, а). Каждая линия связи между узлами системы представляет собой совокупность позиции  $v_{10}$  и обычного перехода  $s_{\pi c}$ , связанных между собой дугой (рис. 1, б). УИ представляется только позицией  $v_{yy}$  (рис. 1, в).

Пакеты, передаваемые в АСУ, в модели представля-N — количество УИ, задействованных в АСУ, N ≥ 1; ются фишками. Так как АСУ может быть представлена

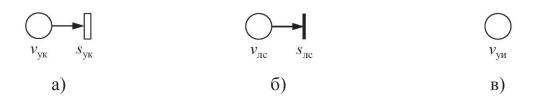


Рис. 1. Графическое представление структурных элементов АСУ: а – узел коммутации; б – линия связи; в – узел-исполнитель

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

в виде совокупности нескольких подсистем, каждая фишка имеет свойство — цвет, соответствующий подсистеме, по которой она может быть передана. В связи с этим каждый переход каждой линии связи, в зависимости от подсистемы, в которой организована эта линия связи, получает дополнительное условие срабатывания — фишка должна быть помечена цветом, соответствующим подсистеме. Условия срабатываний переходов и правила изменения разметки сети для каждого перехода, кроме составных, задаются специальными таблицами, учитывающими цвета фишек [5].

Все УК и УИ АСУ можно представить в виде множеств:

 $V_{\rm yk} = \left\{ v_{\rm ykk} | k = \overline{1,K} \right\}$  — множество позиций, соответствующих УК;

 $S_{y\kappa} = \left\{ s_{y\kappa k} | k = \overline{1,K} \right\}$  — множество переходов, соответствующих УК;

 $V_{yu} = \left\{ v_{yun} | n = \overline{1, N} \right\}$  — множество позиций, соответ-

Исходя из структуры АСУ можно утверждать, что для каждой подсистемы множества УК и УИ будут равными, а организованные между ними линии связи будут разными и будут определяться:

- наличием соответствующего оборудования в узлах системы;
  - правилами организации связи.

Следовательно, линии связи, организованные в q-ой подсистеме, можно представить в виде множеств:

 $V_{\rm nc}^q = \left\{v_{\rm ncl}^q | l = 1, L_q \right\}$ — множество позиций, соответствующих линиям связи, организованным в q-ой подсистеме АСУ;

 $S_{\rm nc}^q = \left\{ s_{\rm ncl}^q \middle| l = \overline{1, L_q} \right\}$  — множество переходов, соответствующих линиям связи, организованным в q-ой подсистеме АСУ.

В модели одной подсистемы цветом фишки и дополнительным условием срабатывания переходов  $s^q_{\rm ncl}$  можно пренебречь, а переходы  $s_{\rm ykk}$  считать не составными, а обыкновенными. Следовательно, модель одной подсистемы представляет собой простую (то есть без расширений) сеть Петри.

На основании выше сказанного модель q-ой подсистемы ACУ  $C_q$  будет иметь вид: стемы ACУ  $C_q$  будет иметь вид: стемы ACУ  $C_q$  будет иметь вид:

$$C_q = (V_q, S_q, I_q, O_q), \tag{1}$$

где  $V_q = V_{
m yK} \cup V_{
m yH} \cup V_{
m nc}^q$  — множество позиций сети;  $S_q = S_{
m yK} \cup S_{
m nc}^q$  — множество переходов сети;  $I_q: S_q o V_q$  — входная функция сети — отображение

из переходов в комплекты позиций, являющихся входными позициями переходов;

 $O_q: S_q o V_q$  — выходная функция сети — отображение из переходов в комплекты позиций, являющихся выходными позициями переходов.

Следует пояснить, что УК и УИ в создаваемой модели соединяются с ЛС следующим образом:

- переход, соответствующий УК, соединяется одной дугой с позицией, соответствующей ЛС, для ЛС, исходящей из УК:
- переход, соответствующий ЛС, соединяется одной дугой с позицией, соответствующей УК или УИ, для ЛС, входящей в УК или УИ.

Графическое представление k-го УК и n-го УИ, соединённых l-ой ЛС в q-ой подсистеме, изображено на рис. 2. Для удобства восприятия УК обозначен пунктирной линией, а ЛС — штрих-пунктирной.

Исходя из структуры модели  $C_q$  справедливы выра-

$$\begin{split} I_q\left(s_{\text{ykk}}\right) &= \left\{v_{\text{ykk}}\right\}; \ I_q\left(s_{\text{ncl}}^q\right) = \left\{v_{\text{ncl}}^q\right\}; \\ O_a\left(s_{\text{ykk}}\right) &\subset V_{\text{nc}}^q; \ O_a\left(s_{\text{ncl}}^q\right) = \left\{v_{\text{ykk}}\right\} \vee \left\{v_{\text{ykh}}\right\}. \end{split}$$

Из представленных выражений следует, что значения функций  $I_q$  и  $O_q$  не содержат повторяющиеся элементы и представляют собой множества (как частные случаи комплектов).

Модель АСУ C не может быть создана простым объединением подсистем, представленных моделями  $C_{_q}$  (1), и представляется раскрашенной иерархической сетью Петри:

$$C = (V, S, I, O, M), \tag{2}$$

где  $V=\bigcup_{m\in M}V_m=V_{\rm yk}\cup V_{\rm yh}\cup \left(\bigcup_{m\in M}V_{\rm nc}^m\right)$ — множество позиций сети;

$$S = \bigcup_{m \in M} S_m = S_{y_K} \cup \left(\bigcup_{m \in M} S_{x_C}^m\right) -$$
 множество переходов

си- сети, |S| = U (где  $S_{yk}$  — множество составных переходов: каждый переход представлен подсетью Петри  $C'_{ykk}$ ,  $S_{nc}^m$  — множества раскрашенных переходов, которые обла- (1) дают дополнительным условием срабатывания: фишка должна быть помечена цветом m);

 $I:S \to V$  – входная функция сети – отображение из переходов в комплекты позиций, являющихся входными позициями переходов,

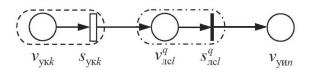


Рис. 2. Графическое представление УК и УИ, соединённых ЛС

$$I\left(\boldsymbol{s}_{\text{ykk}}\right) = I_m\left(\boldsymbol{s}_{\text{ykk}}\right) = \left\{\boldsymbol{v}_{\text{ykk}}\right\}, \ I\left(\boldsymbol{s}_{\text{ncl}}^m\right) = I_m\left(\boldsymbol{s}_{\text{ncl}}^m\right) = \left\{\boldsymbol{v}_{\text{ncl}}^m\right\}$$

 $O: S \to V$  — выходная функция сети — отображение из переходов в комплекты позиций, являющихся выходными позициями переходов,

$$\begin{split} O\!\left(\boldsymbol{s}_{\scriptscriptstyle{\mathsf{YK}k}}\right) &= \!\left(\bigcup_{\boldsymbol{m}\in M} O_{\boldsymbol{m}}\!\left(\boldsymbol{s}_{\scriptscriptstyle{\mathsf{YK}k}}\right)\right) \!\!\subset\! \left(\bigcup_{\boldsymbol{m}\in M} V_{\scriptscriptstyle{\mathsf{NC}}}^{\boldsymbol{m}}\right)\!, \\ O\!\left(\boldsymbol{s}_{\scriptscriptstyle{\mathsf{NC}l}}^{\boldsymbol{m}}\right) &= O_{\boldsymbol{m}}\!\left(\boldsymbol{s}_{\scriptscriptstyle{\mathsf{NC}l}}^{\boldsymbol{m}}\right) \!=\! \left\{\boldsymbol{v}_{\scriptscriptstyle{\mathsf{YK}k}}\right\} \!\vee\! \left\{\boldsymbol{v}_{\scriptscriptstyle{\mathsf{YWN}}}\right\}; \end{split}$$

 $M = \left\{ m | m = \overline{1,Q} \right\}$ — множество цветов фишек, где цвет фишки m соответствует принадлежности к q-ой подсистеме.

В модели C(2) значения функций I и O не содержат повторяющиеся элементы и представляют собой множества (как частные случаи комплектов).

Перед выполнением сети Петри C устанавливается начальная разметка  $\mu_0$ : фишки помещаются в позиции, соответствующие узлу-источнику пакета, и раскрашиваются цветами соответствующих подсистем. В результате выполнения сети возможно установить факт получения пакета любым УИ, а также выявить все пути, которыми этот пакет может быть получен. Каждый такой путь до n-го УИ представляет из себя конечную последовательность запусков переходов из множества S:

$$\omega_{nj} = (s_{u1}, s_{u2}, ..., s_{uX_j}),$$
(3)

где  $\underline{X_j}^-$  количество переходов в j-ом пути до n-го УИ,  $j=\overline{1,Y_n}$  ;

 $Y_n$  — количество путей до n-го УИ.

Все пути доведения приказа до n-го УИ есть конечное множество  $\Omega_n = \left(\omega_{n,1}, \omega_{n,2}, ..., \omega_{n,Y_n}\right)$ . Вычисление  $\Omega_n$  возможно двумя способами:

- 1. Моделирование выполнения сети Петри C.
- 2. Построение и анализ дерева достижимости сети Петри *С*. Структура и алгоритм построения дерева достижимости в теории сетей Петри определены однозначно и описаны в литературе [5, 6].

Использование дерева достижимости может привести к потере информации и, возможно, к тому, что некоторые свойства сети Петри определить будет нельзя [5]. В связи с этим для вычисления  $\Omega_n$  необходимо провести моделирование выполнения сети Петри C.

В соответствии с исходными данными каждому переходу  $s_u$ ,  $u=\overline{1,U}$ , из множества S для вычисления вероятностных характеристик ставится в соответствие вероятность его срабатывания  $p_u$ , равная: на узле коммутации —  $p_{ykk}$ , в линии связи —  $p_{ncl}^q$ . Для вычисления временных характеристик в соответствии с исходными данными каждому переходу ставится в соответствие время срабатывания  $t_u$ , равное: на узле коммутации — времени обработки пакета  $t_{oбpk,i} \in T_{oбpk}$  (вычисляется при выполнении составного перехода  $s_{ykk}$ ), в линии связи —  $t_{ncl}^q$ . Для учёта этих характеристик

в работе сети необходимо дополнить модель (2) помечающей функцией  $\Sigma$  над алфавитом  $A = \left\{a_u | u = 1, \overline{U}\right\}$ , где  $a_u = \langle s_u, p_u, t_u \rangle$ . То есть  $\Sigma : S \to A$ ,  $\Sigma(s_u) = a_u$ , при этом [6]

$$\Sigma \big( \omega s_u \big) \! = \! \begin{cases} \! \Sigma \big( \omega \big) \Sigma \big( s_u \big), \text{ если } \Sigma \big( s_u \big) \text{ определено} \\ \! \Sigma \big( \omega \big), \text{ если } \Sigma \big( s_u \big) \! = \! \Sigma \big( \lambda \big) \end{cases},$$

где  $\omega$  — последовательность переходов, запущенных непосредственно перед переходом s.;

$$\Sigma(\lambda) = \lambda;$$

λ – пустое слово.

Таким образом, модель (2) принимает следующий вил:

$$C_{\Sigma} = (C, \Sigma) = (V, S, I, O, M, \Sigma). \tag{4}$$

Работа помечающей функции заключается в том, что каждая фишка при прохождении через переход помечается и значение помечающей функции сохраняется в соответствующий массив данных. Следовательно, для каждого искомого пути (последовательности запусков переходов)  $\omega_{n,j}$  (3) фишкой фиксируется соответствующая последовательность

$$\left(\left\langle s_{u1}, p_{u1}, t_{u1}\right\rangle, \left\langle s_{u2}, p_{u2}, t_{u2}\right\rangle, ..., \left\langle s_{uX_j}, p_{uX_j}, t_{uX_j}\right\rangle\right)$$

Рассмотрим построение составных переходов  $s_{ykk}$ . Их (3) основное предназначение — моделирование процесса обработки пакета (полученного на УК), заключающе-И, гося в:

- передаче пакета без изменения подсистемы;
- передаче пакета, полученного в одной подсистеме, в другие подсистемы;
- блокировке возможных в сети  $C_{\Sigma}(4)$  циклов [6] передачи пакетов, которые в реальных системах блокируются программно-аппаратным способом.

Структура составного перехода зависит от оборудования, размещённого на УК, и полномочий оператора.

На каждом УК после получения пакета его обработка и подготовка к передаче проводится, как правило, поэтапно:

- 1) дешифрование, декодирование пакета (аппаратно);
- 2) подготовка к передаче пакета (оператором или ппаратно);
- 3) трансформация пакета для передачи в других подсистемах АСУ (оператором или аппаратно) при наличии такой возможности;
  - 4) кодирование, шифрование пакета (аппаратно).

Уровень развития современной техники позволяет проводить этапы 1 и 4 достаточно быстро, по сравнению с этапами 2 и 3, где возможно участие оператора. Кроме того, этапы 1 и 4 не влияют на логику обработки пакета, что позволяет пренебречь ими.

В общем виде составной переход  $s_{ykk}$  представляется раскрашенной помечающей сетью Петри  $C'_{ykk}$ , и далее для упрощения записи индекс k опустим, так

2020

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

как он относится к каждому элементу рассматриваемой сети:

$$C'_{yK} = (V', S', I', O', M', \Sigma')$$

$$(5)$$

где V' — множество позиций сети;

S' – множество переходов сети;

 $I': S' \to V'$  — входная функция сети — отображение из переходов в комплекты позиций, являющихся входными позициями переходов;

 $O': S' \to V'$ — выходная функция сети— отображение из переходов в комплекты позиций, являющихся выходными позициями переходов;

 $M' = \{1, 2, ..., Q, \text{ stop}\}$  — множество цветов фишек;  $\Sigma' : S' \to B$  — помечающая функция над алфавитом  $B = \{b_i \mid i = \overline{1,I}\}, b_i = \langle s_{yk}, p_{yk}, t_{oбpi} \rangle$ .

Следует отметить, что составной переход  $s_{y_K}$  не помечает фишки [6], и их пометка производится при работе соответствующей сети  $C'_{KII}$ .

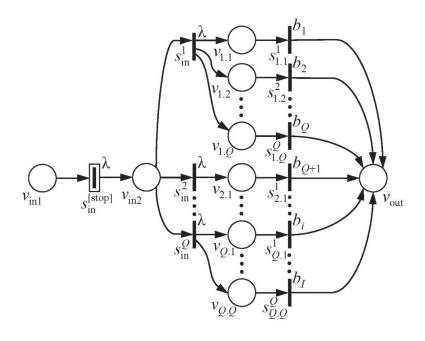
Начальная разметка сети Петри  $C'_{\rm kn}$  (5) заключается в помещении фишки, полученной из позиции  $v_{\rm yk}$ , во входную позицию  $v_{\rm inl}$  (рис. 3).

Имеющиеся в настоящее время расширения сетей Петри не позволяют организовать блокировку циклов. Для моделирования этого процесса в рассматриваемую сеть Петри введён новый тип перехода «переход с условием» —  $s_{\rm in}^{[{\rm stop}]}$ . Результатом его срабатывания является: при выполнении заданного условия по анализу очереди сохранённых меток помечающей функции, фишка меняет свой цвет, при невыполнении — оставляет прежний, и в обоих случаях перемещается в выходную позицию  $v_{\rm in}$ . Переход  $s_{\rm in}^{[{\rm stop}]}$  проверяет наличие в соответствующем фишке массиве значений

помечающей функции элемента « $s_{v_k}$ » и при его наличии меняет цвет фишки на «stop». Это значит, что фишка ранее уже проходила переход  $s_{yx}$ , образовался цикл, и из позиции  $v_{\rm in}$ , она не выйдет. Переходы  $s_{\rm in}^1, s_{\rm in}^2, ..., s_{\rm in}^Q$ являются цветными и сработают, если фишка, находящаяся в позиции  $v_{in2}$ , обладает цветом, соответствующим верхнему индексу в обозначении перехода. Далее фишка поступает в область сети, соответствующую своей подсистеме, и появляется в позициях, количество которых соответствует возможностям передачи фишки-приказа в подсистемах АСУ. Например, если фишка в позиции  $v_{\rm in}$ , имела цвет «1», сработает переход  $s_{\mathsf{in}}^1$  и фишки появятся в позициях  $v_{1.1}, v_{1.2}, ..., v_{1.Q}$ . При этом фишка, находящаяся в позиции  $v_{11}$ , далее будет распространяться в первой подсистеме,  $v_{1,2}$  — во второй, ...,  $v_{1,\mathcal{Q}}$  — в Q-ой. Переходы  $s_{1,1}^1,\ s_{1,2}^2,\ ...,\ s_{1,\mathcal{Q}}^{\mathcal{Q}}$  при срабатывании помечают фишки метками  $\langle s_{
m yk}, p_{
m yk}, t_{
m oбpi} \rangle$ , где  $t_{
m oбpi}$ соответствует значению времени, затраченному на обработку пакета для передачи в соответствующую подсистему, а также меняют их цвет в соответствии с цветами этих подсистем. После срабатывания этих переходов фишки появляются в позиции  $v_{\text{out}}$ .

Аналогично срабатывают переходы в областях сети, соответствующих другим подсистемам. При этом в рассмотренном примере распространение фишекпакетов возможно из любой подсистемы — в любую подсистему, но при моделировании конкретной АСУ можно задать другие возможности.

После окончания выполнения сети  $C'_{y\kappa}$  в позиции  $v_{\text{out}}$  будут находиться фишки, полученные из  $v_{\text{in1}}$ , раскрашенные цветами, соответствующими подсистемам дальнейшего распространения, и помеченные соответствующими метками. Далее фишки из позиции  $v_{\text{out}}$ 



 $Puc.\ 3.\ \Gamma$ рафическое представление сети Петри  $C'_{v\kappa}$ 

переходят в сеть  $C_{\Sigma}(4)$ , а разметка сети  $C'_{v\kappa}$  очищается.

В результате выполнения сети  $C_{\Sigma}$  (4) в позициях множества  $V_{yn}$  будут находиться фишки, каждая из которых будет содержать последовательность меток, соответствующих пройденным переходам, вероятностям и времени их срабатывания. Следовательно, возможно вычислить и поставить в соответствие каждому варианту доведения пакета  $\omega_{nj}$  (3) вероятность доведения пакета  $P_{n,j}$  и время доведения пакета  $T_{n,j}$ . Так как события, описанные последовательностью вероятностей  $(p_{u1}, p_{u2}, ..., p_{uX_j})$  срабатывания переходов независимые, то вероятность их совместного наступления есть произведение  $P_{n,j} = p_{u1} \cdot p_{u2} \cdot ... \cdot p_{uX_j}$ . Время доведения пакета есть сумма  $T_{n,j} = t_{u1} + t_{u2} + ... + t_{uX_j}$ . Отсутствие фишек в позиции  $v_{yun}$  означает не доведение пакета до n-го УИ.

Таким образом, предложенная модель позволяет оперативно оценивать вероятность и время доведения пакетов до узлов-исполнителей территориально-распределённой иерархической АСУ в произвольный момент времени при деградации структуры АСУ и изменениях характеристик её элементов.

Таким образом, предложенная модель позволяет оперативно оценивать вероятность и время доведения пакетов до узлов-исполнителей территориально-распределённой иерархической АСУ в произвольный момент времени при деградации структуры АСУ и изменениях характеристик её элементов.

#### Литература

- 1. Кулешов, И. А. Анализ методов моделирования сетей связи / И.А. Кулешов, М. А. Дуплинский, Ю. А. Малахов // Научно-технические ведомости СПбГТУ. -2010. № 2. С. 148-152.
- 2. Тронин, В. Г. Применение раскрашенных сетей Петри в моделировании вычислительной сети / В.Г. Тронин // Автоматизация процессов управления. 2007.  $\mathbb{N}$  2. С. 97–102.
- 3. Ивутин, А. Н. Теория сетей Петри и её расширения / А.Н. Ивутин, Е. И. Дараган // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. № 10. С. 211–221.
- 4. Кудж, С. А. Моделирование с использованием сетей Петри / С.А. Кудж, А.С. Логинова // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 1 (6). С. 10–22.
- 5. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон : перевод с англ. под ред. В.А. Горбатова. М. : Мир, 1984. 264 с.
- 6. Котов, В. Е. Сети Петри / В.Е. Котов. М. : Мир, 1984. 160 с.