

СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ БЕСПИЛОТНЫХ СУДОВ И СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ ПРОЦЕССОМ МЕТОДОМ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩЕЙ СЕТИ ПЕТРИ

Шканов В.В., аспирант кафедры «Судовождение», ФГБОУ ВО «Государственный Морской Университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова»
Попов В.В., д.т.н., профессор кафедры «Судовождение», ФГБОУ ВО «Государственный Морской Университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова»

В настоящем исследовании разработана структура управления потоком беспилотных судов и разработана модель автоматической системы управления транспортным процессом (АСУТП) при помощи метода синтеза управляющей сети Петри. Структурированная дискретно-событийная система используется в разработке АСУТП для анализа работоспособности модели.

Ключевые слова: беспилотное судно, сеть Петри, сетевые системы, е-навигация.

THE NETWORK-CENTRIC PRINCIPLE OF CONSTRUCTING THE STRUCTURE OF CONTROLLING THE FLOW OF UNMANNED SHIPS AND CREATING A MODEL OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE TRANSPORT PROCESS USING THE METHOD OF SYNTHESIS OF THE CONTROL NETWORK OF PETRI

Shkanov V., the post - graduate student of the Navigation chair, FSEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University»
Popov V., Doctor of Technigues, Professor of the Navigation chair, FSEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University»

In this study, a structure for controlling the flow of unmanned ships was developed and a model of an automatic transport process control system (ASTCS) was developed using the method of synthesis of the Petri control network. A structured discrete-event system is used in the development of an automated process control system for analyzing the performance of a model.

Keywords: unmanned ship, Petri net, network-centric systems, e-navigation.

Концепция е-навигации основана на надежном взаимодействии судно-судно и судно-берег при помощи систем связи включающих высокоскоростную систему передачи данных для обеспечения безопасности судовождения в прибрежных, портовых водах и районах с интенсивным движением. Настоящие системы морской вязы и ГМССБ должны обеспечивать интегрированный мостик судна постоянно обновляющимися данными в реальном времени с последующей обработкой и принятием решения по принципу:



Для передачи навигационной информации в том числе в виде цифровых файлов, а также возможности шифрования конфиденциальной информации должны быть разработаны и модернизированы уже существующие спутниковые навигационные системы, а также уже сейчас рассматривается вопрос добавления частот в КВ.

Во время этой работы необходимо сначала определить требования пользователей, а во-вторых, принять во внимание что разработка Е-навигации не должна определяться только техническими требованиями. Кроме того, необходимо обеспечить, чтобы человеко-машинный интерфейс и человеческий элемент будет учитываться, включая подготовку персонала. Уроки, извлеченные из разработки и функционирования ГМССБ и АИС, должны учитываться при разработке электронной навигации. Принимая во внимание ГМССБ в качестве сети передачи данных для Е-навигации, следует также определить морские районы А1, А2, А3 и А4.

Техническое усовершенствование оборудования ГМССБ может означать потенциальную замену обычного оборудования виртуальным. В этом подходе в развитии е-навигации очень важно, чтобы целостность ГМССБ не подвергалась опасности. Оборудование ГМССБ как и система Инмарсат, могут использоваться как способ передачи данных для е-навигации, при условии, что MF, HF и VHF GMDSS оборудование технически совершенствуется посредством:

- оцифровки аналоговой связи MF, HF и VHF;
- применением высокоскоростного канала для ГМССБ;
- использованием SDR (SoftwareDefinedRadio) технологии;
- адаптации технологии IP (Интернет-протокола) к ГМССБ;
- интеграции пользовательского интерфейса оборудования ГМССБ;
- а также включения любой другой надлежащей технологии для улучшения ГМССБ

Что касается аспектов коммуникации, требуемых для е-навигации, следует также учитывать следующее:

- автономное обнаружение и режим переключения;
- общий формат обмена сообщениями;

- достаточная надежность;
- адекватная безопасность (например, шифрование);
- достаточная пропускная способность (емкость данных);
- Потенциал роста;
- автоматическое формирование отчетов;
- глобальный охват (может быть достигнут с применением различных систем);
- использование одного языка, возможно, с другими языками, в качестве опции.

Все вышеперечисленные опции должны быть включены в Интегрированный мостик судна. Построим полезную модель такого мостика с возможностью управления беспилотным судном для его органического включения в береговой сегмент Системы Е-навигации при вхождении в зону ответственности национальной морской администрации порта (ЗОНМАП):

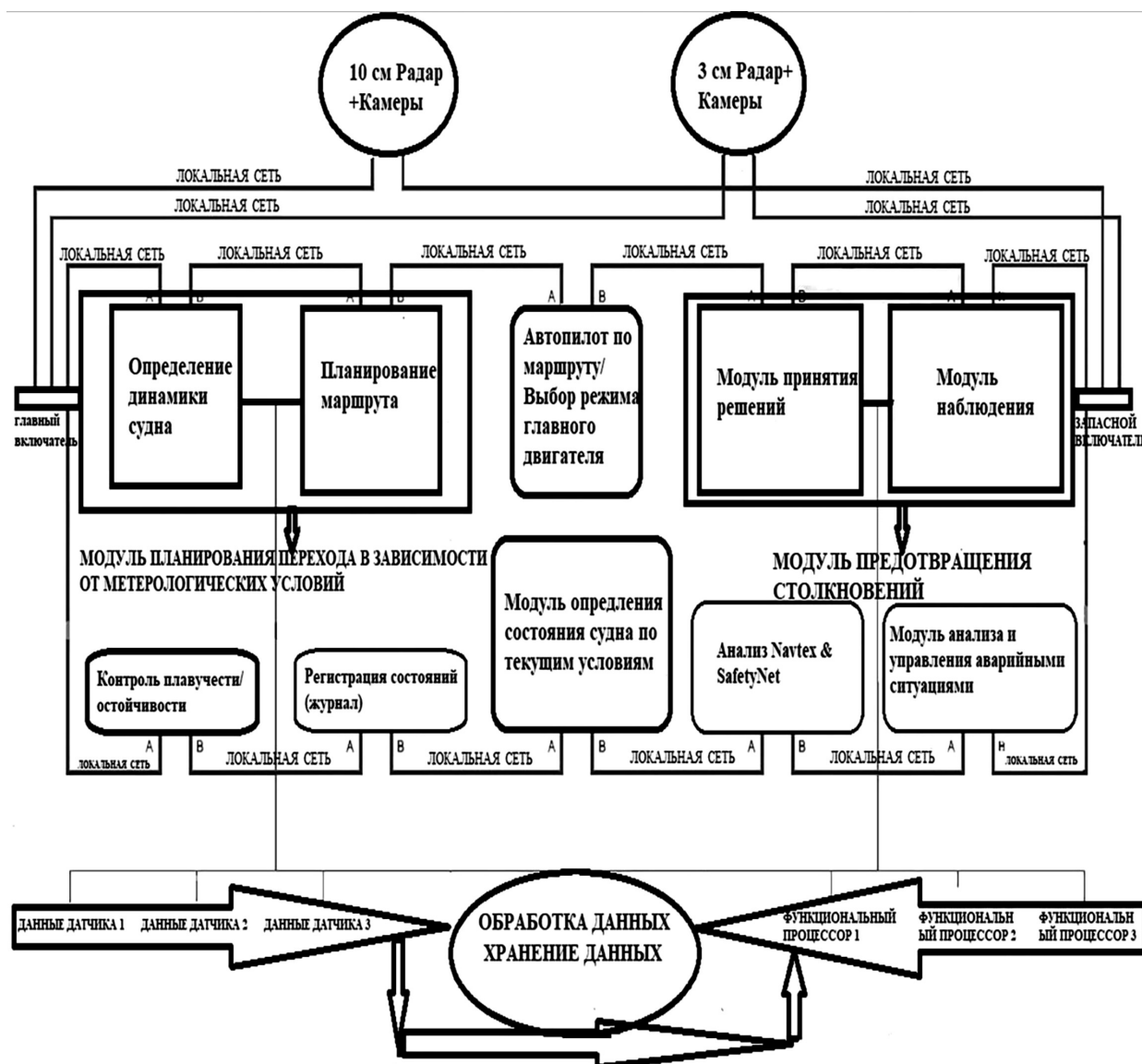


Рис 1.1. Интегрированный ходовой мостик беспилотного судна

В нормальном понимании, беспилотное судно работает в режиме автономного управления, где вмешательство оператора необходимо только для того чтобы был передан план перехода и порт назначения. В контексте навигации это означает, что Береговой Центр Управления (БЦУ) или команда контроля на борту (ККБ) изначально задали план перехода и рабочую программу, но в будущем управление судами должно осуществляться автономными системами на месте без вмешательства человека. В этой настройке соответствующие входные параметры для процесса автономной навигации в основном предоставляются расширенным сенсорным модулем или модулем определения состояния судна по текущим условиям, что обеспечивает автономной навигационной системе восприятие внешних факторов, включая условия окружающей среды, а также данные по целям для обнаруженных объектов. Для этого используется метод, основанный на использовании датчиков, где в модуле обработки собираются “сырые” данные с существующих навигационных датчиков, извлекается информация, а затем все это сопоставляется между собой в модуле определения состояния судна по текущим условиям для достижения надежной модели окружающей судна среды и поступает команда в модуль автопилота и выбора режима главного двигателя.

Для управления и контроля за безопасным движением потока морских объектов и судов в ЗОНМАП а также для прогнозирования гармонии судопотока для обеспечения необходимой подачи груза необходимо создать береговой центр управления (БЦУ). Для решения поставленной задачи управления целесообразно применить схему организации на базе сетевидного подхода:

В сетевидной модели БЦУ каждый элемент является частью общей компьютерной сети и состоит из модуля контроля и сбора данных окружающей информации (сенсор), модуля управления, модуля анализа и прогноза условий и модуля принятия решения по анализу сенсоров и прогнозов. Информационный обмен осуществляется посредством высокоскоростного канала обмена данными. При помощи высокоскоростного канала обмена данными происходит обмен информацией. При этом необходимо создать автоматическую систему управ-

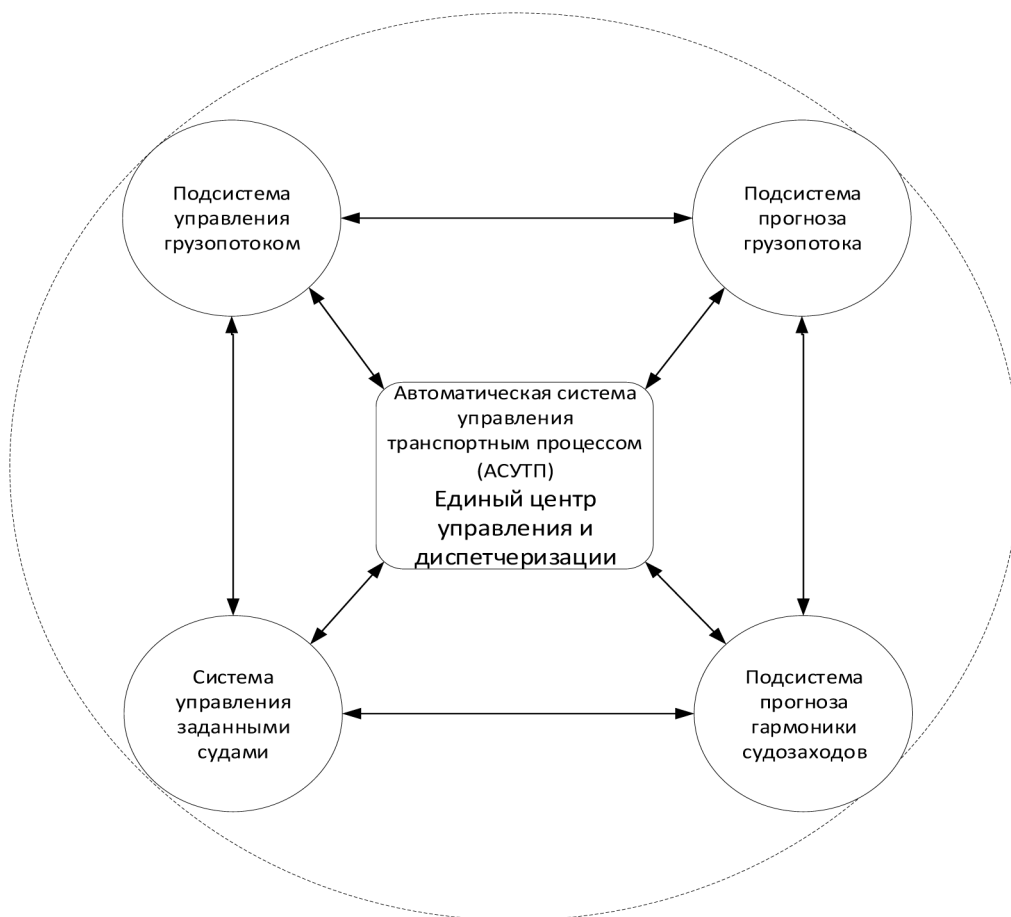


Рис 1.2. Структурная схема организации БЦУ на базе сетецентрического подхода

ления транспортным процессом (АСУТП) в едином центре управления и диспетчеризации. АСУТП на основании данных полученных от системы прогноза гармонии судозаходов и грузопотока принимает решение по выбору команды для подсистемы управления заданными судами и грузопотоком, где оператором на основании данных полученных от АСУТП на первом этапе принимается окончательное решение; в будущем возможно исключение оператора из всего процесса.

Для создания модели АСУТП как супервизора управления целесообразно применить Метод синтеза управляющей сети Петри. Основой метода синтеза управляющей сети Петри является следующая особенность: каждая последующая операция объекта выполняется только по внешнему событию (это может быть запуск или выбор) а также после завершения события выполнения предыдущей операции (можно представить, как падение выставленных вертикально костяшек домино). В этом случае задача супервизорного управления – организовать передачу активности (управления) от элемента к элементу по завершению их операций, например, погрузки (выгрузки) судна или постановки (отхода судна) и т.д.

Введем необходимые понятия и отметим ряд свойств сети процесса, которые в принципе доказуемы, но ограниченный объем статьи не позволяет это изложить. Исключим из строк, входящих в LS^H , символы состояний. Далее в тексте все события e_{ij} заменим именами переходов t_i и перенумеруем сплошной нумерацией по мере их следования в S_p , например, как это показано на рис 3. Тогда строка LS^H примет вид:

$$\downarrow t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 t_6 t_7 t_8 \uparrow$$

Несвязанные пары переходов. Переход t_{ij} сети S_p называется несвязанной парой (н-парой), если t_{ij} LSH и в сети S_p не существует позиции p_k такой, что $t_j \in p_k$, а $t_i \notin p_k$.

Свойство 1. При преобразовании сети S_p в S_p путем расширения S_p звеном $t_j \rightarrow t_i$ (далее просто $t_j t_i$) Р-инварианты сети S_p сохраняются в сети S_p (преобразование иллюстрирует звено на рис. 1.3, выделенное пунктиром). Однако множество достижимых состояний, несомненно, изменится. Более того, ограниченная сеть S_p преобразуется в неограниченную S_p , поскольку в позиции p_{ϵ} возможен неограниченный рост числа меток при бесконечном цикле в первой сети. [1]

Свойство 2. Для всякой н-пары $t_i t_j$ скалярное произведение векторов – столбцов $(W(t_i), W(t_j)) = 0$. Следует из факта отсутствия связующих их позиций.

Свойство 3. Пусть расширение сети S_p осуществляется множеством звеньев, сконструированных для всех н-пар из последовательности срабатывания u , соответствующей LS^H . При этом вектор Париха $Y(LS^H)$, соответствующий u , является Т-инвариантом сети S_p , поскольку LS^H задает циклический процесс, а $G = (G^1, G^2, \dots, G^n)$ и $H = (Q^h, E_p, \delta_p, \Gamma^h, Q_m^h, q_0)$ согласованы. Тогда существует изоморфное отображение $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_p\}$ – множества достижимых векторов-состояний компонент G, G_1, G_2, \dots, G_n (где $Q : q_1, q_2, \dots, q_n$, $n_{aj}, j_1, j_2, \dots, j_n$. М – множество достижимых маркировок сети S_p . Кроме того, Р-инварианты сети S_p сохраняются в S_p и $Y(LS^H)$ является Т-инварианты сети S_p . Из сформулированных свойств следует, что если для всех возможных последовательностей строк, задаваемых, например, ЛСПС, выявить все н-пары $t_i t_j$ и каждую пару в сети процесса обеспечить звеном $t_j p_{\epsilon} t_i$ передачи управления (активности), то, во-первых, все структурные свойства исходной сети процесса сохраняются; во-вторых, все требуемые последовательности операций, определяемые спецификацией, будут выполняться. Мы ограничимся разработкой ядра метода, ограничивающего LS^H бесповторной⁴ ЛСПС, содержащей одну последовательность. Это ограничение далее будет снято. [2] Опишем процедуру проектирования управляющей сети S_c из СПУ $t_j p_{\epsilon} t_i$ для ЛСПС, содержащей одну бесповторную последовательность срабатывания переходов (управляющую сеть S_c иногда называют сетью контроллера).

Процедура построения управляющей сети S_c .

Обозначения, используемые в тексте процедуры: *Sintez* – имя процедуры; W, P, n, u, r – формальные параметры; $u := t_1 t_2 \dots t_{r-1} t_r$ – строка ЛСПС, обрабатываемая процедурой (в u стрелочки заменены именами переходов, на которые эти стрелочки указывают в ЛСПС); r – длина строки u ; $W(n \times m)$ – матрица инцидентности сети процесса S_p ; $W(k) = 0$ означает присвоение всем элементам строки k матрицы

W значение 0; $u(i)$ i -ый символ строки u . $W(u(i))$, $W(u(i+1))$ – векторы-столбцы матрицы W , $SProduct(W(u(i)), W(u(i+1)))$ – скалярное произведение векторов. Текстпроцедуры:

```

Sintez( $W, Pc, n, u, r$ )  $i = 1$ 
While  $i \leq r$  do Begin
If  $SProduct(W(u(i)), W(u(i+1))) \neq 0$  go to  $M1$ ;  $n = n + 1$ ;
 $W(n) = 0$ ;
 $W(n, u(i)) = +1$ ;
 $W(n, u(i+1)) = -1$ ;
 $Pc = \{Pc\} \cup \{p_n\}$ ;
 $M1: i = i + 1$ 
End.

```

Применим процедуру **Sintez** к сети S_p (см. рис. 1.3) для двух механизмов G^1 и G^2 . Матрица инцидентности W этой сети представлена в таблице 1. В матрице W имена событий заменены именами соответствующих переходов следующим образом: $(e_{1,1} \rightarrow t_1) \dots (e_{2,4} \rightarrow t_8)$. Обрабатываемая строка

$u := t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 t_6 t_7 t_8$; $r = 9$.

Результатом работы процедуры **Sintez** является построение сети S из четырех управляющих позиций (p_{c1}, \dots, p_{c4}). Объединенная сеть S_p и S_c представлена на рис. 1.3.

Вычисление. Вектор начальной маркировки $\mu^T = [\mu^T \mu^T]$ состоит из начальной разметки μ^T сети процесса S_p и начальной разметки μ_{0c}^T сети контроллера S_c .

Первая часть μ^T определяется при построении S_p и соответствует начальным состояниям ЛСПС (в позициях вектора μ^T , соответствующих начальным состояниям в определении ЛСПС присваивается 1, а остальным 0).

Правило для начальной разметки μ_{0c}^T . Поскольку вектор Y является T -инвариантом (задает цикл), то если из него исключить срабатывание последних в цикле переходов, то матричная операция W с модифицированным Y определит начальную разметку для S_c . [3]

Таблица 1. Матрица инцидентности W для СП элементов G^1 и G^2

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8
P_1	-1	0	0	1	0	0	0	0
P_2	1	-1	0	0	0	0	0	0
P_3	0	1	-1	0	0	0	0	0
P_4	0	0	1	-1	0	0	0	0
P_5	0	0	0	0	-1	0	0	1
P_6	0	0	0	0	1	-1	0	0
P_7	0	0	0	0	0	1	-1	0
P_8	0	0	0	0	0	0	1	-1
P_{c1}	0	+1	0	0	-1	0	0	0
P_{c2}	0	0	-1	0	0	+1	0	0
P_{c3}	0	0	0	+1	0	0	-1	0
P_{c4}	-1	0	0	0	0	0	0	+1

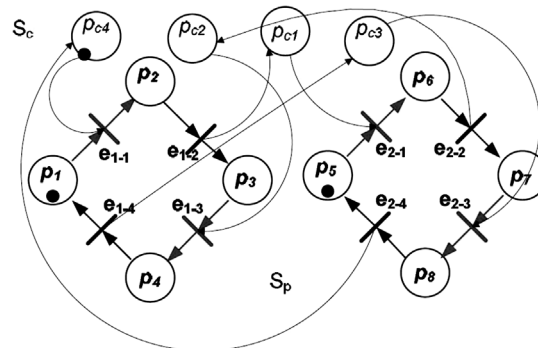


Рис 1.3. Сеть Петри с управляющими позициями, реализующими управление, так, что выполняется последовательность $u := t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 t_6 t_7 t_8 t_1$

Процедура **Sintez** вводит позицию, передающую управление, для каждой n -пары подобно каналу связи. Эти каналы «работают» только в момент активности соответствующей n -пары и после передачи управления в следующие переходы не участвуют в процессе активизации других переходов, пока в следующем цикле они не будут вновь востребованы. Из чего следует, что формирование для каждой n -пары нового канала в сети во многих случаях избыточно. Прозрачно определяются отношения совместимости каналов (по отсутствию пересечения предшественников и последователей) и соответствующие правила. Эти правила подобны правилам совместимости состояний для конечного автомата. Применив эти правила и проделав традиционные преобразования, для нашего примера удалось сократить число позиций в два раза. Результат представлен на рис 1.4.

Далее необходимо структурировать объект. Структуризация объекта начинается с выделения всех актуаторов (приводов и исполнительных систем); пусть это будет $G = (G^1, G^2, \dots, G^n)$. Для каждого G^i : множество событий, являющихся командами E_c^i , множество событий E^i , характеризующих траекторию движения этой конкретной системы (множество реакций на E_c^i) и, наконец, определяется множество условий, внешних относительно $G^i - E_{ic}$. Общий алфавит для $G^i - E^i = \{E_w^i \cup E_c^i \cup E_{ic}^i\}$. Взаимосвязь команд (E_c^i), ожидаемых реакций и внешних условий (если это требуется) на практике представляется в виде диаграмм (циклограмм), что достаточно прозрачно формализуется конечным автоматом $G^i = \langle Q^i, E^i, \delta_i, \Gamma^i, Q_m^i, q_o^i \rangle$. Здесь и далее такие автоматы будем называть компонентными конечными автоматами

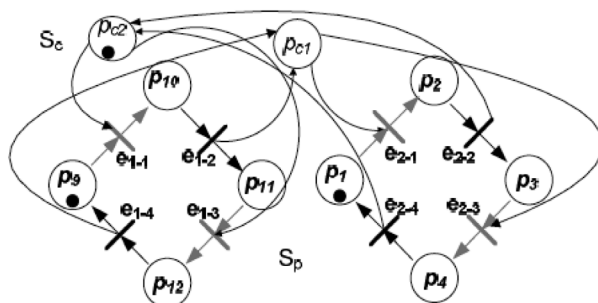


Рис 1.4 Преобразованная сеть Петри, выполняющая последовательность $u := t_{1,2}t_{3,6}t_{3,4}t_{7,8}t_{1,1}$

(ККА). В итоге анализа объекта определяются: состав СДСС $G = \langle G^1, G^2, \dots, G^n \rangle$, множества E событий, каждое из которых структурируется на $E^i = \{E_w^i \cup E_c^i \cup E_{uc}^i\}$, и множество E_{uc} – общих неуправляемых событий. Пример графа перехода КА модели такого механизма представлен на рис. 1.5а. Следующим этапом построения СДСС является определение востребованного поведения набора компонент. Поведение представляется как последовательность команд из $E_c = U_{i=1}^n E_c^i$, заданной строками в языке $K \in E_d^*$. При этом в спецификацию входят только строки, соответствующие множеству путей на графе переходов конечного автомата $H = (Q^h, E_d^h, \partial_h^h, \Gamma^h, Q_m^h, q_0^h)$. В примере на рис. 1.5 представлен ККА первой системы, а второй в точности до обозначений событий (индекс начинается с 2) опущен. Спецификация их востребованного поведения представлена на рис. 1.5б).

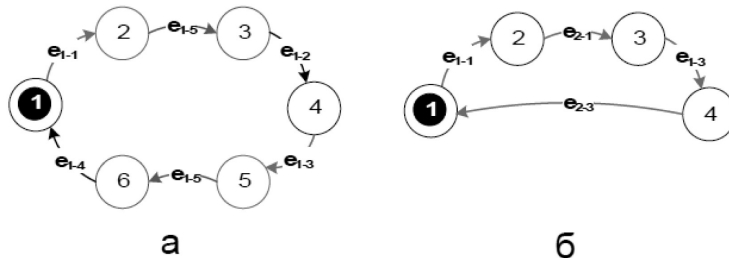


Рис 1.5. а) ККА – модель механизма G1; б) автомат спецификации H

Завершающим этапом СДСС-моделирования является проверка управляемости на основе алгоритма эксперимента $\mathcal{R}(s)$, который является основным инструментом при изучении совместного поведения G и H. Результатом эксперимента \mathcal{R} над строками $s \in K$ (все строки допустимы для начального состояния q_0) может быть $(s) = \text{True} | \text{False}$. Если после всех действий над символами s все компоненты вили свои переходы, то $(s) = \text{True}$; если во время эксперимента новый символ $s(i)$ не «сработал» в соответствующей компоненте, тогда $(s) = \text{False}$. В последнем случае подразумевается, что H не согласован с G и спецификация требуемого поведения (автомат должна быть изменена. В завершение анализа определим $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$ – множество достижимых векторов-состояний компонент $G = \langle G^1, G^2, \dots, G^n \rangle$, где $Q_i := q_1, q_2, \dots, q_n$ и каждое Q_i соотносится с q_i^h .

Таким образом в работе для интеграции АСУТП, работающих в реальном времени, разработана методология синтеза управляющей сети Петри, базирующаяся на важнейшем концепте сетевидного управления: неизменность функциональности автономных компонент и выполнение на уровне сетевой интеграции обработки информации. Методология основана на использовании структурированной дискретно-событийной системы (СДСС) для анализа функциональности и согласованности модели.

Литература:

1. ЗАКРЕВСКИЙ А.Д., ПОТТОСИН Ю.В., ЧЕРЕМИСИНОВА Л.Д. Логические основы проектирования дискретных устройств. – М.: Физматлит, 2007 – 588 с.
2. ЗАЦАРИННЫЙ А.А., ПРИСЯЖНЮК С.П., ИОНЕН-КОВ Ю.С. Тенденции развития современных инфокоммуникационных технологий с учетом концепции сетевидных войн // Информация и космос. – 2006. – №4. – С. 85–93. – URL: <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=644974>.
3. ИВАНОВ Н.Н., МИХАЙЛОВ Г.И., РУДНЕВ В.В. ТАЛЬ А.А. Конечные автоматы: эквивалентность и поведение. – М.: Наука, 1984. – 192 с.
4. ИВЛЕВ А.А. Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации. Москва, 2008. – 64 с. – URL: http://old.vko.ru/pdf/2008/library/08_05_23_02.pdf.
5. ЛАЗАРЕВ В.Г., ПИЙЛЬ Е.И. Синтез управляющих автоматов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.