

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 51-74

Имитационная модель сети военной связи

Моисеев А.А., Чуев А.В., Киселев А.А., Миронов А.А.

Аннотация. Постановка задачи: ядром статьи для комплексного, всестороннего исследования сети военной связи выбран системный анализ, на основе которого рассматриваемая сеть включает в свой состав подсистемы: узлов (станций), линий, управления, обеспечения, резервов. В рассматриваемой исследовательской задаче представляется весьма затруднительным формулировка объекта в виде аналитической математической модели, а также аналитические и численные решения являются малоэффективными из-за их громоздкости и ограничений на вычислительные ресурсы. **Результат:** на этом основании представлена последовательность разработки имитационной математической модели сети военной связи на базе принципов модульности и структурного подобия, используя теорию сетей Петри и их логическую схему построения. Для реализации указанного подхода предложены следующие этапы моделирования: синтез морфологической структуры имитационной модели, структуризация имитационной модели, формализация и алгоритмизация элементов модели, разработка описаний позиций и переходов сети, отладка и проведение компьютерных экспериментов. С точки зрения научной проблематики, наибольший интерес представляют первые три этапа, которые подробно рассматриваются в статье. Важнейшей функцией математического имитационного моделирования является не только и не столько получение количественных оценок, а адресная помощь исследователю (разработчику) разобраться в существе изучаемой (проектируемой) системы. Это выражается в адекватном отражении процессов функционирования сложной многоуровневой иерархической системы, позволяя учитывать при этом отличительные, индивидуальные особенности системы и описывать асинхронность и параллелизм выполнения процессов и событий. Предложенный подход создает предпосылки объективного взгляда на реальные процессы, сосредоточивая их внимание не на частностях, а на закономерностях.

Ключевые слова: сеть военной связи, имитационная модель, сеть Петри, макропереход, примитивные события, непримитивные события, оператор, элементарная функция, дерево функций.

Введение

Основополагающими принципами построения имитационной модели сети военной связи (СВС) являются модульность и структурное подобие. Принцип модульности предполагает деление моделируемой сети на фрагменты (модули), каждый из которых представляет собой технологически автономный объект, описываемый своей имитационной моделью [1]. Автономность означает, что данный модуль имеет относительно небольшое число связей с другими модулями. Это дает возможность выполнить проверку качества функционирования построенной модели фрагмента.

Под структурным подобием СВС и модели будем понимать соответствие каждого существенного с точки зрения решаемой задачи элемента сети элементу модели.

Имитационные модели функционирования СВС и реализующие их программные комплексы должны обеспечивать быструю настройку на различную технологическую структуру. Кроме того, они должны выступать в качестве инструментария, позволяющего учитывать специфику сети, а также асинхронность и параллелизм выполнения процессов и событий. Указанные аспекты позволяют при построении имитационной модели СВС использовать аппарат теории сетей Петри, в наибольшей степени отвечающий рассмотренным требованиям [2, 3]. При разработке имитационной модели функционирования сети на основе аппарата теории сетей Петри и в соответствии с принципами модульности и структурного подобия могут быть выделены следующие этапы моделирования.

Первый этап – синтез морфологической структуры имитационной модели, отражающей структуру рассматриваемой сети.

Второй этап – структуризация имитационной модели СВС с определением действующих в сети процессов и используемых ресурсов, учетом множества позиций (в модели отображают состояния процессов и ресурсов) и переходов (событий), подмножества синхронизирующих переходов. Перечисленные множества и подмножества удается построить в окончательном виде только в простых задачах моделирования. В большинстве случаев состав множества позиций и переходов сети неоднократно уточняется.

На третьем этапе производится формализация и алгоритмизация элементов модели, предполагающая формирование атрибутов меток, ограничений на число меток, способов упорядочения и начального распределения меток для каждой позиции. Для формального описания перехода требуется определение множества смежных с этим переходом позиций, условий возбуждения, схемы и процедуры выполнения перехода.

На четвертом этапе программирования модели осуществляется разработка описаний позиций и переходов сети, оформляемых в виде фрагментов программ.

Пятый этап – отладка и проведение компьютерных экспериментов с имитационной моделью. Его содержанием является включение в программу модели операторов, обеспечивающих задание начальных условий, сбор статистики и управление прогонами модели.

С точки зрения научной проблематики наибольший интерес представляют первые три этапа. Четвертый и пятый этапы носят чисто прикладной характер.

Морфологическая структура имитационной модели сети военной связи

На основании принципа подобия и учитывая особенности функционирования СВС, ее имитационную модель ($M_{СВС}$), можно представить в виде кортежа [1]:

$$M_{СВС} = \langle M_{ПУз}, M_{ПЛС}, M_{ПУпр}, M_{ПОб}, M_{ПРез} \rangle, \quad (1)$$

где $M_{ПУз}$ – имитационная модель подсистемы узлов (станций),

$M_{ПЛС}$ – имитационная модель подсистемы линий связи;

$M_{ПУпр}$ – имитационная модель подсистемы управления;

$M_{ПОб}$ – имитационная модель подсистемы обеспечения;

$M_{ПРез}$ – имитационная модель подсистемы резерва.

Каждая из рассматриваемых подсистем, кроме подсистемы управления, охвачена индивидуальным целенаправленным воздействием со стороны подсистемы управления. На этом основании каждая из моделей подсистем $M_{ПУз}$, $M_{ПЛС}$, $M_{ПОб}$, $M_{ПРез}$ включает индивидуальную модель подсистемы управления и свое специализированное оборудование, поэтому по аналогии с (1) можно записать:

$$\left. \begin{aligned} M_{ПУз} &= \langle M_{ПУпр1}, M_{СОУз} \rangle, \\ M_{ПЛС} &= \langle M_{ПУпр2}, M_{СОЛС} \rangle, \\ M_{ПОб} &= \langle M_{ПУпр3}, M_{СООб} \rangle, \\ M_{ПРез} &= \langle M_{ПУпр4}, M_{СОРез} \rangle \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $M_{ПУпр1}$ – имитационная модель управления подсистемой узлов (станций);

$M_{СОУз}$ – имитационная модель специализированного оборудования подсистемы узлов (станций);

$M_{ПУпр2}$ – имитационная модель управления подсистемой линий связи;

$M_{СОЛС}$ – имитационная модель специализированного оборудования подсистемы линий связи;

$M_{ПУпр3}$ – имитационная модель управления подсистемой обеспечения;

$M_{СООб}$ – имитационная модель специализированного оборудования подсистемы обеспечения;

$M_{ПУпр4}$ – имитационная модель управления подсистемой резерва;

$M_{СОРез}$ – имитационная модель специализированного оборудования подсистемы резерва.

Строго говоря, подсистема управления СВС по иерархии подчиняется старшей управляющей системе, которая на нее воздействует, но для уменьшения размерности решаемой задачи этот факт вводится в разряд ограничений. Такое положение вполне допустимо в ходе построения имитационной модели.

В свою очередь, имитационные модели специализированного оборудования подсистем узлов (станций), линий связи, обеспечения, резерва выражаются в виде:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{COY}_3} &= M_{\text{COY}_3}^1, M_{\text{COY}_3}^2, \dots, M_{\text{COY}_3}^{i_1}, M_{\text{COY}_3}^{N_{\text{COY}_3}}, \\ M_{\text{COЛC}} &= M_{\text{COЛC}}^1, M_{\text{COЛC}}^2, \dots, M_{\text{COЛC}}^{i_2}, M_{\text{COЛC}}^{N_{\text{COЛC}}}, \\ M_{\text{COO6}} &= M_{\text{COO6}}^1, M_{\text{COO6}}^2, \dots, M_{\text{COO6}}^{i_3}, M_{\text{COO6}}^{N_{\text{COO6}}}, \\ M_{\text{COPe3}} &= M_{\text{COPe3}}^1, M_{\text{COPe3}}^2, \dots, M_{\text{COPe3}}^{i_4}, M_{\text{COPe3}}^{N_{\text{COPe3}}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $M_{\text{COY}_3}^{i_1}$ – имитационная модель i_1 -го элемента подсистемы узлов (станций);

$M_{\text{COЛC}}^{i_2}$ – имитационная модель i_2 -го элемента подсистемы линий связи;

$M_{\text{COO6}}^{i_3}$ – имитационная модель i_3 -го элемента подсистемы обеспечения;

$M_{\text{COPe3}}^{i_4}$ – имитационная модель i_4 -го элемента подсистемы резерва.

Подставив (2), (3) в (1) получаем трехуровневую имитационную модель СВС:

$$\begin{aligned} M_{\text{CBC}} &= \langle M_{\text{ПУпр}}, \langle M_{\text{ПУпр1}}, \langle M_{\text{COY}_3}^1, M_{\text{COY}_3}^2, \dots, M_{\text{COY}_3}^{N_{\text{COY}_3}} \rangle \rangle, \\ &\quad \langle M_{\text{ПУпр2}}, \langle M_{\text{COЛC}}^1, M_{\text{COЛC}}^2, \dots, M_{\text{COЛC}}^{N_{\text{COЛC}}} \rangle \rangle, \\ &\quad \langle M_{\text{ПУпр3}}, \langle M_{\text{COO6}}^1, M_{\text{COO6}}^2, \dots, M_{\text{COO6}}^{N_{\text{COO6}}} \rangle \rangle, \\ &\quad \langle M_{\text{ПУпр4}}, \langle M_{\text{COPe3}}^1, M_{\text{COPe3}}^2, \dots, M_{\text{COPe3}}^{N_{\text{COPe3}}} \rangle \rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

Графическое изображение трехуровневой имитационной модели СВС (4) представлено на рис. 1.

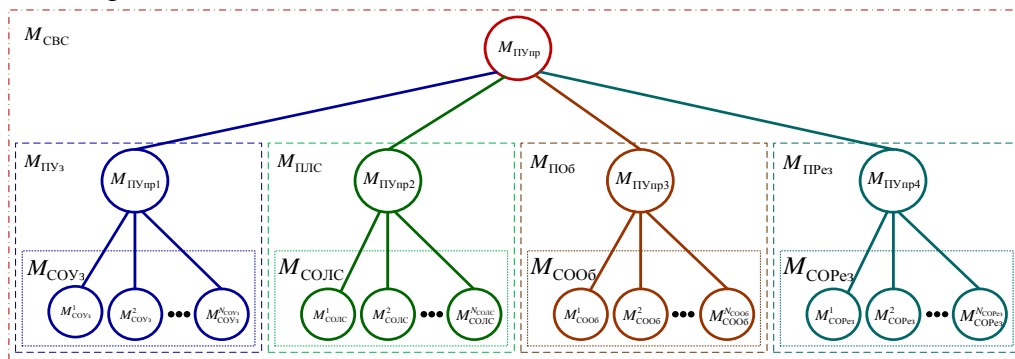


Рис. 1. Структура трехуровневой имитационной модели сети военной связи

Рассмотрим взаимодействия между элементами модели M_{CBC} , используя уравнение «вход-выход» моделей (1)-(4) и общий подход к моделированию связей между моделями, представленными сетью Петри (рис. 1), на котором сеть Петри показана в виде макроперехода t^i (прямоугольник на рис. 2). При этом мы допускаем, что из внешнего окружения помещаются маркеры в позиции $P_{jk} (k = \overline{1, K_i})$, соответствующие входным условиям сети Петри, а маркеры, появившиеся в выходных позициях сети Петри $P_{Ol} (l = \overline{1, L_i})$, удаляются оттуда. При таком подходе любая сеть может рассматриваться как макропереход модели более высокого уровня. С другой стороны, переход может детализироваться в форме отдельной подсети для более полного исследования аспектов моделируемой системы.

Модель M_{CBC} представим в виде входов и выходов моделей подсистем, ее составляющих, и определяемых позициями $P_{jk}^i, (k = \overline{1, K_i})$ и $P_{Ol}^i, (l = \overline{1, L_i})$ макропереходов t^i

соответственно, $i = \overline{1, 4}$. Подсистема узлов (станций) определяется при $i = 1$, подсистема линий связи при $i = 2$, подсистема обеспечения при $i = 3$, подсистема резерва при $i = 4$. Основные характеристики маркеров позиций (ХМП(Р)) имеют описание и значения, представляемые, как правило, в табличной форме для конкретной СВС.

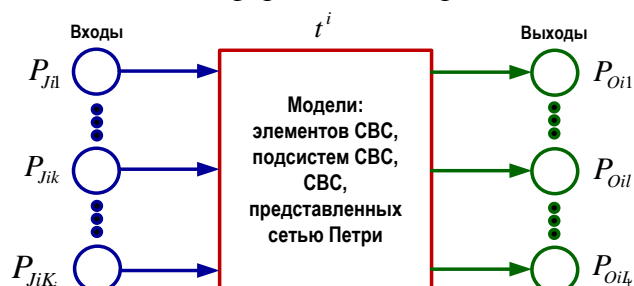


Рис. 2. Моделирование связей между подсистемами, представленными сетью Петри

Модель $M_{\text{ПУпр}}$ представлена в $M_{\text{СВС}}$ в виде управляющей программы, задающей значения ХМП(Р) входов имитационной модели подсистемы управления подсистемами СВС, такими как: виды услуг связи, виды родов связи, способы предоставления услуг связи, пропускная способность линий и направлений связи, устойчивость функционирования, количество специализированного оборудования, характеристики функционирования подсистем, внешние, случайные и преднамеренные воздействия на СВС соответствующих моделей в динамике.

Для соединения входов и выходов моделей подсистем СВС используется оператор $\tilde{R}(t)$, который представляется в виде матрицы связей позиций макропереходов t^i .

Выражения (1-4) и представленные в табличном виде ХМП(Р) и $\tilde{R}(t)$ есть ничто иное, как морфологическая модель СВС, описывающая состав и функционирование ее подсистем.

С точки зрения моделей $M_{\text{СВС}}$ и $M_{\text{ПУз}}$ функционирование $M_{\text{ПУз}}^i$ определяется изменением множества маркеров позиций макроперехода t^i и изменением характеристик этих маркеров. Характеристики маркеров имитационной модели специализированного оборудования для i_1 -ой технологической операции $M_{\text{ПУз}}^i$, позволяют представить макропереход (модель) t^i в виде отдельного модуля, инвариантного относительно изменения множества применяемого специализированного оборудования и множества технологических операций, выполняемых на этом оборудовании.

Таким образом, $M_{\text{ПУз}}^i$ представляет собой модель инвариантного модуля, описывающего функционирование i_1 -ой технологической операции. Для $M_{\text{СВС}}$ и $M_{\text{ПУз}}$ настройка инвариантного модуля на конкретную модель осуществляется при помощи изменения внутренних параметров $M_{\text{ПУз}}^i$. Определяя значения маркеров во входных позициях $M_{\text{ПУз}}^i$ можно осуществить автономную проверку работоспособности полученной модели по значениям маркеров в позициях выхода модели $M_{\text{ПУз}}^i$.

Аналогичным образом можно выделить инвариантные модули, описывающие работу специализированного оборудования подсистем линий, обеспечения и их систем управления. Следовательно, для получения имитационной модели $M_{\text{СВС}}$ – выражение (1), надо разработать:

программу, реализующую взаимодействие подсистем $M_{\text{СВС}}$;

инвариантные модули, представляющие подсистемы узлов (станций) $M_{\text{ПУз}}$, линий связи $M_{\text{ПЛС}}$, управления $M_{\text{ПУпр}}$, обеспечения $M_{\text{ПОб}}$, резерва $M_{\text{ПРез}}$;

инвариантные модули, описывающие функционирование специализированного оборудования узлов (станций) – $M_{\text{ПУз}}^i$, линий связи – $M_{\text{ПЛС}}^i$, обеспечения – $M_{\text{ПОб}}^i$, резерва – $M_{\text{ПРез}}^i$.

Для построения $M_{\text{СВС}}$, в виде сети Петри, необходимо создать логическую схему получения структуры имитационной модели СВС на основе дерева функций системы.

Структуризация имитационной модели сети военной связи

Для проведения указанной операции рассмотрим алгоритм построения структуры имитационной модели функционирования СВС, заключающийся в формировании структуры сети Петри на основе дерева функций рассматриваемой сети [4]. Дерево функций СВС состоит из дерева функций подсистем узлов (станций), линий связи, управления, обеспечения и резерва. Рассмотрим связь дерева функций с основными элементами сети Петри – позициями и переходами.

Построение модели СВС основывается на анализе совокупности всех ее функций и определении количественных характеристик отдельных показателей качества сети. Кроме того, должны быть определены функции отдельных подсистем сети, которые определяют функции, возлагаемые на элементы подсистем. Таким образом, будем исходить из того, что функции сети представляют интегрированную совокупность функций отдельных элементов, образующих СВС. При этом целостные свойства рассматриваемой сети будем обеспечивать формированием дерева функций, представляющего декомпозицию ее целевой функции.

Основные и дополнительные функции сети, реализуемые отдельными подсистемами, формируются в процессе декомпозиции. При синтезе структуры модели, СВС представляется в виде обобщенного целевого оператора Π^0 , определяющего правило преобразования входных воздействий и состояния сети в ее реакцию.

Из анализа причинно-следственных связей между входами, выходами и состоянием рассматриваемой сети формируется совокупность операторов Π_k^1 СВС. Каждому из этих операторов ставятся в соответствие входы и выходы СВС первого уровня. Операторы Π_k^1 представляют собой результат декомпозиции оператора Π^0 :

$$\Pi^0 = \bigcup_{k=1, \bar{K}} \Pi_k^1. \quad (5)$$

Аналогично, операторы Π_k^1 могут быть декомпозированы на элементарные операторы, которые, в свою очередь, также могут быть декомпозированы. Таким образом, при K уровнях декомпозиции:

$$\Pi^0 = \bigcup_{k=1, \bar{K}} \bigcup_{n_1=1, \bar{N}} \bigcup_{n_2=1, \bar{N}_2} \dots \bigcup_{n_k=1, \bar{N}_k} \Pi_{n_1, n_2, \dots, n_k}^k, \quad (6)$$

где $N_1 = f_1(k)$; $N_2 = f_2(k, N_1)$; ...; $N_k = f_k(k, N_1, N_2, \dots, N_{k-1})$.

Глубина декомпозиции определяется априорными сведениями о существенных параметрах моделируемой сети, которые должны быть учтены, а также результатами анализа поведения сети, автономных и комплексных проверок функционирования подсистем и СВС в целом. При этом иерархия операторов предполагает, что цели нижнего уровня иерархии подчинены целям верхнего уровня, т. е. цели верхнего уровня не могут быть достигнуты, пока не достигнуты все цели ближайшего нижнего уровня.

Полученная таким образом иерархия целей при введении в нее структурных элементов, функции которых состоят в реализации соответствующих элементарных подцелей, составляет базу для синтеза структуры сети Петри исследуемой СВС.

Рассмотренный переход от дерева целей к структуре модели позволяет сформировать древовидный граф модели исследуемой сети, в котором нижнему уровню дерева целей соответствуют элементарные сети Петри, ориентированные на выполнение элементарных функций. В общем случае, в зависимости от глубины декомпозиции, каждой элементарной сети Петри соответствует либо один выходной технологический параметр (уровень элементарных функций-целей), либо группа параметров (уровень агрегированных функций-целей).

функции и учитывает возможности возникновения нежелательных и недопустимых ситуаций. Оператор S_{025} – определяет начальные данные для декомпозиции функций сети, например, количество уровней декомпозиции сети прототипа. Оператор A_5 – определяет число уровней декомпозиции множества базовых и дополнительных функций анализируемой СВС, а также формирует данные \bar{X}_{36} и \bar{X}_{47} для декомпозиции сети. Векторные величины \bar{X}_{36} , \bar{X}_{47} совместно с выходными данными \bar{X}_{56} и \bar{X}_{57} оператора A_5 являются необходимой предпосылкой для выполнения декомпозиции множества базовых (A_6) и дополнительных (A_7) функций СВС на элементарные, в трактовке создаваемой модели, функции.

Полученные таким образом элементарные функции описываются операторными формами A_8 , A_9 для анализа правильности декомпозиции сети (P_{10}^*) и проверки совместного взаимодействия полученных моделей на уровне «вход-выход». При обнаружении неточности описания выполняется возврат к оператору A_5 .

Проведение анализа операторных моделей позволяет провести оценку качества декомпозиции базовых и дополнительных функций сети. Кроме того, дает возможность проверить соответствие определенных в процессе декомпозиции и построенных операторных моделей уровню детализации и обеспечить функционирование моделей каждого уровня с учетом иерархии организации сети. Переход с нижнего уровня на верхний уточняет связи между отдельными компонентами. При положительном результате анализа, элементарные функции описываются операторами A_{11} (базовые), A_{12} (дополнительные) в виде непримитивных событий (с учетом временных параметров функций, определяемых техническими и технологическими характеристиками элементов сети – операторы S_{011} , S_{012}) и примитивных событий теории сетей Петри. Операторы P_{13} и P_{14} классифицируют события на примитивные – A_{15} и непримитивные – A_{16} . Операторы A_{17} – A_{20} определяют: предусловия непримитивных событий (A_{17}), постусловия непримитивных событий (A_{18}), предусловия примитивных событий (A_{20}), постусловия примитивных событий (A_{19}). Операторы A_{21} и A_{22} определяют правила выполнения непримитивных (A_{21}) и примитивных (A_{22}) переходов, изменение предусловий и постусловий. Элементарным функциям ставятся в соответствие переходы t_k ($k = \overline{1, K}$) сети Петри. Предусловиям выполнения переходов соответствует множество позиций $I(t_k)$:

$$I(t_k) = \{p_{lkl}\} \quad (k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L_k}), \quad (7)$$

а постусловиям выполнения переходов t_k – множество позиций $O(t_k)$:

$$O(t_k) = \{p_{okj}\} \quad (k = \overline{1, K}, j = \overline{1, J_k}), \quad (8)$$

правила выполнения элементарных функций (срабатывание переходов), которые связывают изменения предусловий $I(t_k)$ перехода t_k с изменением постусловий $O(t_k)$. Наличие условий в позициях (или их отсутствие) характеризуется метками, несущими определенный набор атрибутов. Порядок изменения количества меток и их атрибутов определяется элементарными функциями анализируемой сети.

Задача оператора P_{23} – анализ функционирования полученных сетей Петри элементарных функций, а оператора A_{24} – формирование сети Петри подсистем верхних уровней и всей СВС в целом. Для оценки пригодности получаемой модели на сетях Петри верхних уровней проводятся автономные проверки их функционирования.

Вместе с тем, проведенный в ходе построения модели сети анализ не защищает от внутренних ошибок самого описания, которые делают его «некорректным». Ошибки описания могут проявляться в неразрешимых ситуациях, которые не позволяют довести выполнение анализируемой сети до конца. Некорректности описания распознают и устраняют в результате формального анализа моделей, который включает исследование свойств самой сети Петри, в том числе и способа прописки позиций и переходов этой сети. Если сеть Петри работоспособна и не

содержит неразрешимых противоречий, то при любых последовательностях маркировок сети не возникает коллизий и повторного выполнения незавершенных операций.

В терминах логических схем алгоритмов процесс построения имитационной модели СВС в виде сети Петри на основе дерева функций имеет вид:

$$S_{01}A_1S_{02}A_2\Pi(\bar{X}_{23}, \bar{X}_{24})[\bar{X}_{23}]A_3[\bar{X}_{24}]A_4W(\bar{X}_{23}, \bar{X}_{24})S_{025}\downarrow_1 A_5\Pi(\bar{X}_{56}, \bar{X}_{57})[\bar{X}_{56}]\{A_6A_8\Pi(\bar{X}_{80}, \bar{X}_{810}, \bar{X}_{811})[\bar{X}_{80}]S_{80}[\bar{X}_{810}]P_{10}\uparrow^1[\bar{X}_{811}]S_{011}A_{11}P_{13}\uparrow^3\downarrow_2 A_{15}\Pi(\bar{X}_{1517}, \bar{X}_{1518})[\bar{X}_{1517}]A_{17}[\bar{X}_{1518}]A_{21}\Pi(\bar{X}_{210}, \bar{X}_{2123})[\bar{X}_{210}]S_{210}[\bar{X}_{2123}]P_{23}\uparrow^1[\bar{X}_{57}]\} \quad (9)$$

$$\{A_7A_9\Pi[\bar{X}_{90}, \bar{X}_{910}, \bar{X}_{912}][\bar{X}_{90}]S_{90}[\bar{X}_{910}]P_{10}\uparrow^1[\bar{X}_{912}]S_{012}A_{12}P_{14}\uparrow^2\downarrow_3 A_6\Pi(\bar{X}_{1619}, \bar{X}_{1620})[\bar{X}_{1619}]A_{19}A_{22}\Pi(\bar{X}_{220}, \bar{X}_{2223})[\bar{X}_{220}]S_{220}[\bar{X}_{2223}]P_{23}\uparrow^1 A_{24}P_{25}\uparrow^1 A_{26}S_{260}\},$$

где $\Pi(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_k)$ – оператор параллельного выполнения ветвей с именами $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_k$; $W(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_k)$ – оператор условия, определяющий порядок выполнения оператора, стоящего справа от него (выполнение возможно при условии, что выполнение ветвей, с именами $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_k$, уже закончено).

Выходными операторами в выражении (9) являются S_{80} с вектором данных $\bar{X}_{80} = \{\text{операторные модели базовых функций, выраженных через элементарные функции}\}$, S_{90} с вектором $\bar{X}_{90} = \{\text{операторные модели дополнительных функций, выраженных через элементарные функции}\}$. Указанные модели позволяют осуществить предварительное исследование структурных свойств СВС. Выходные операторы S_{210} и S_{220} представляют собой элементарные сети Петри элементарных функций и сети Петри подсистем СВС. S_{230} и S_{250} – диагностические операторы для возврата в A_5 при обнаружении ошибок анализа полученных сетей Петри. На выходе S_{260} формируется структура сети Петри СВС для построения динамической модели и имитационной модели функционирования СВС. Сказанное можно обобщить в виде логической структуры (схемы), приведенной на рис. 4.

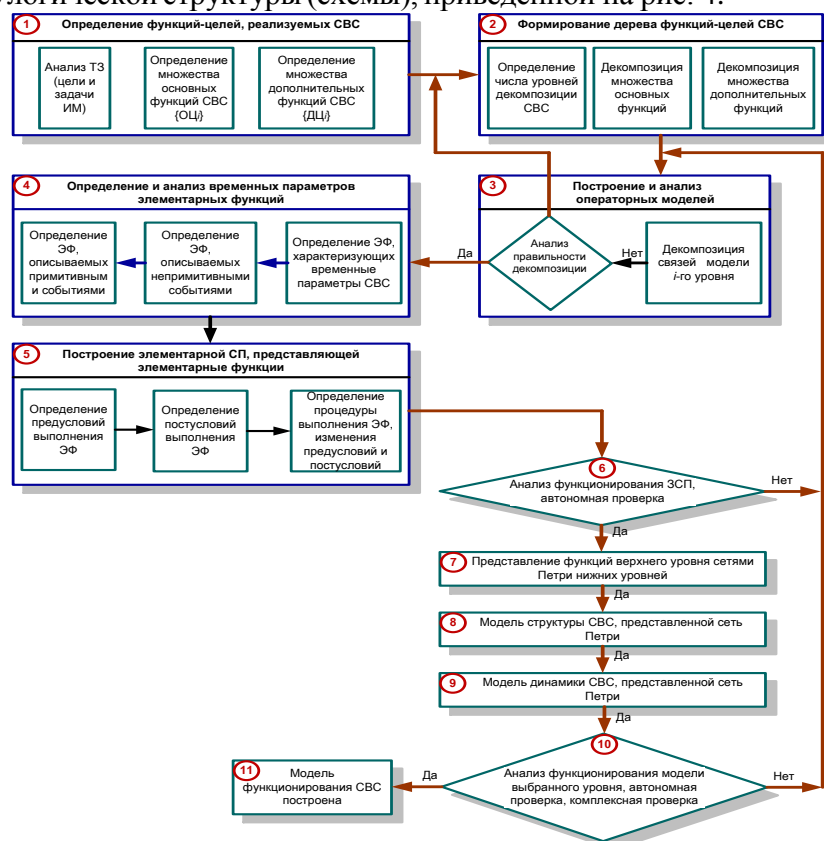


Рис. 4. Логическая схема построения модели динамики сети военной связи на основе теории сетей Петри

Интересным является частный алгоритм, реализующий построение структуры имитационной модели СВС в виде модулей, рассмотренных выше:

$$S_{025} \downarrow_1 A_5 \Pi(\bar{X}_{56}, \bar{X}_{57})[\bar{X}_{56}]\{A_6 A_8 \Pi(\bar{X}_{80}, \bar{X}_{810})[\bar{X}_{80}]S_{80}[\bar{X}_{810}]P_{10} \uparrow^1\}[\bar{X}_{57}], \quad (10)$$

$$\{A_7 A_9 \Pi[\bar{X}_{90}, \bar{X}_{910}][\bar{X}_{90}]S_{90}[\bar{X}_{910}]P_{10} \uparrow^1\}^1 S_{80} S_{90}.$$

Этот алгоритм позволяет представить иерархическую модульную структуру модели из элементов и подсистем СВС.

Представленная логическая схема создания структуры имитационной модели СВС в виде сети Петри, на основе дерева функций системы, позволяет получить сеть Петри СВС по частям, отдельно для каждой подсистемы сети и осуществить ее автономную проверку, что особенно важно при создании имитационных моделей функционирования сложных систем.

Формализация имитационной модели сети военной связи

Для формализации модели, описывающей реализацию функции-цели $\Pi_{n_1, n_2, \dots, n_i}^i$ рассматриваемой на i -ом уровне иерархии в виде сети Петри, возьмем элементарные функции $\Pi_{n_1, n_2, \dots, n_i, n_1^1, n_2^1, \dots, n_i^1}^1$, определяющие $\Pi_{n_1, n_2, \dots, n_i}^i$ и представляющие также фрагмент древовидной структуры. Этот фрагмент представляет собой n -ю подсистему СВС, рассматриваемую на i -ом уровне иерархии и выполняющую функцию-цель $\Pi_{n_1, n_2, \dots, n_i}^i$ СВС. Для упрощения обозначений, переходы, описывающие элементарные функции-цели $\Pi_{n_1, n_2, \dots, n_i}^i$, будем представлять в виде:

$$t_{nk}^i = Y_{nk}^i(O_n^1, Z_n^1, \Pi_n^1), \quad (i = \overline{1, I}), \quad (n = \overline{1, N_i}), \quad (k = \overline{1, K_n^i}), \quad (11)$$

где i – рассматриваемый уровень иерархии;

O_n^i – количество уровней иерархии;

N_i – количество объектов O_n^i в подсистеме i -го уровня;

K_n^i – количество переходов в объекте с номером n ;

Z_n^i – задачи, решаемые имитационной моделью для объекта O_n^i на i -ом уровне иерархии;

Π_n^i – функции, реализуемые n -ой подсистемой на i -ом уровне иерархии.

Каждому переходу t_{nk}^i поставим в соответствие множество входных позиций $\{P_{lnkj}^i\}$ и множество выходных позиций $\{P_{Onkl}^i\}$ сети Петри, так, что:

$$P_{lnkj}^i = F_{lnkj}^i(t_{nk}^i, \tau, (n = \overline{1, N_i}), (k = \overline{1, K_n^i}), (j = \overline{1, J_{nk}^i})),$$

$$P_{Onkl}^i = F_{Onkl}^i(t_{nk}^i, \tau, (n = \overline{1, N_i}), (k = \overline{1, K_n^i}), (l = \overline{1, L_{nk}^i})), \quad (12)$$

где J_{nk}^i – множество входных позиций перехода t_{nk}^i ; L_{nk}^i – множество выходных позиций перехода t_{nk}^i ; τ – модельное время; $F_{lnkj}^i(t_{nk}^i, \tau)$ и $F_{Onkl}^i(t_{nk}^i, \tau)$ – операторы входа и выхода перехода t_{nk}^i .

Условия срабатывания перехода t_{nk}^i , в общем случае, определяются атрибутами входных и выходных меток (входными и выходными переменными функции-цели $O_{n_1, n_2, \dots, n_i, n_1^1, n_2^1, \dots, n_i^1}^1$ во входных и выходных позициях перехода и их количеством:

$$\mu(p_{lnkj}^i, \tau_+) = M_{lnkj}^i(\{A(p_{lnkiv}^i, \tau_-)\}, \{A(p_{Onkvw}^i, \tau_-)\}, \tau_-),$$

$$\mu(p_{Onkl}^i, \tau_+) = M_{Onkl}^i(\{A(p_{lnkiv}^i, \tau_-)\}, \{A(p_{Onklw}^i, \tau_-)\}, \tau_-),$$

$$A(p_{lnkj}^i, \tau_+) = \Pi_{nk}^i(\{A(p_{lnkiv}^i, \tau_-)\}, \{A(p_{Onklw}^i, \tau_-)\}, \tau_-) \quad (13)$$

где $\mu(p_{lnkj}^i, \tau_+)$, $\mu(p_{Onkl}^i, \tau_+)$ – количество меток во входных (p_{lnkj}^i) и выходных (p_{Onkl}^i) позициях перехода t_{nk}^i после его срабатывания (τ_+) ; $\{A(p_{lnkj}^i, \tau_-)\}, \{A(p_{Onkl}^i, \tau_-)\}$ – множество атрибутов меток во входных и в выходных позициях перехода до его срабатывания; $(v=1, \overline{V_{lnkj}^i})$ – количество атрибутов меток во входной позиции p_{lnkj}^i ; $(w=1, \overline{W_{Onkl}^i})$ – количество атрибутов меток в выходной позиции p_{Onkl}^i ; M_{lnkj}^i и M_{Onkl}^i – операторы изменения количества меток во входных и в выходных позициях перехода t_{nk}^i после его срабатывания; Π_{nk}^i – оператор изменения атрибутов выходных меток перехода t_{nk}^i после его срабатывания.

Изменения атрибутов меток сети Петри, определяющих функциональное назначение подсистем СВС, задаются операторами Π_{nk}^i , реализующими инвариантные свойства имитационной модели функционирования СВС.

Для рассматриваемого i -го уровня иерархии имеем:

$$F^i = U_{n,k} \left(\left(U_j F_{lnkj}^i \right) U_l \left(U_l F_{Onkl}^i \right) \right), \quad (14)$$

где F^i – множество операторов, определяющих входные и выходные позиции переходов, рассматриваемых на i -ом уровне:

$$M^i = U_{n,k} \left(\left(U_j M_{lnkj}^i \right) U_l \left(U_l M_{Onkl}^i \right) \right), \quad (15)$$

где M^i – множество операторов, определяющих изменение меток в позициях, рассматриваемых на i -ом уровне;

$$\Pi^i = U_{n,k} \Pi_{nk}^i, \quad (16)$$

где Π^i – множество операторов, определяющих изменение атрибутов меток в выходных позициях переходов, рассматриваемых на i -ом уровне;

$$O^i = U_n O_n^i, \quad (17)$$

где O^i – множество объектов, рассматриваемых на i -ом уровне;

$$\Pi^i = U_n \Pi_n^i, \quad (18)$$

где Π^i – множество функций реализуемых, на i -ом уровне иерархии.

Выражения (12), (13) с учетом (14)–(18) определяют множество сетей Петри описывающих события на i -ом уровне иерархии сети, что можно представить в виде кортежа:

$$C^i = \langle O^i, \Pi^i, F^i, M^i, \Pi^i \rangle. \quad (19)$$

Поскольку сети Петри, определяемые выражением (19), не образуют единого целого, то для того чтобы учесть системные свойства на i -ом уровне иерархии, введем в (19) дополнительную сеть Петри C_0^i , получаемую из (12)–(18) при $n=0$:

$$C^i = \langle C_0^i, O^i, \Pi^i, F^i, M^i, \Pi^i \rangle. \quad (20)$$

Выражение (20) с учетом (12)–(18) определяет сеть Петри, описывающую уже взаимосвязанные события, происходящие в СВС на i -ом уровне иерархии.

Обобщенная сеть Петри для всей СВС получается объединением (20) для всех $i=1, \overline{I}$ с сетью Петри C_0 , выполняющей агрегирующую функцию для всей системы:

$$C = \langle C_0, \bigcup_{i=1}^I C^i \rangle. \quad (21)$$

Сеть Петри, определяемая выражением (10), содержит примитивные ($\Delta\tau_{nk}^i = 0$) и непримитивные ($\Delta\tau_{nk}^i \neq 0$) переходы. Для перехода t_{nk}^i , описывающего непримитивное событие и имеющего продолжительность выполнения $\Delta\tau_{nk}^i \neq 0$, необходимо помимо модельного времени учитывать также время $\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau)$, оставшееся до окончания активного непримитивного события:

$$\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau) = T_{nk}^i\left(\tau, \{\Delta\tau_{nk_1}^{i_1}\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk_2}^{i_2}}(\tau)\}\right) \quad (22)$$

$$i = \overline{0, I}, i_1 = \overline{0, I}, i_2 = \overline{0, I}, n = \overline{0, N^i}, k = \overline{0, K_n^i}, k_1 = \overline{0, K_n^i}, k_2 = \overline{0, K_n^i},$$

где T_{nk}^i – оператор определения времени, оставшегося до окончания непримитивного события, описываемого переходом t_{nk}^i .

Определение модельного времени τ задается оператором Π_τ :

$$\tau = \Pi_\tau\left(\tau, \{\Delta\tau_k, \overline{\Delta\tau_k}(\tau)\}\right), \quad k = \overline{1, K}, \quad (23)$$

где K – число переходов сети Петри рассматриваемой СВС.

Для выполнения полученной сети необходимо задать начальные условия, которые определяются количеством и атрибутами меток в позициях сети Петри в начальный момент времени:

$$\mu_0 = \left\{ \mu(p_{lnkj}^i, \tau = 0), \mu(p_{Onkl}^i, \tau = 0) \right\}, \quad (24)$$

$$A_0 = \left\{ A(p_{lnkj}^i, \tau = 0), A(p_{Onkl}^i, \tau = 0) \right\},$$

$$M_0 = \{\mu_0, A_0\}. \quad (25)$$

Они определяются начальными условиями реализации функции цели СВС. С учетом (24), (25) выражение (21) представляется в виде:

$$C = \left(C_0, \bigcup_{i=1}^I C^i, M_0, \tau \right), \quad (26)$$

которое определяет математическую модель модуля имитационной модели на базе сетей Петри, инвариантного относительно элементов и подсистем СВС различного функционального назначения.

Алгоритмизация имитационной модели сети военной связи

В этом случае будем исходить из того, что состояние модели в каждый момент времени τ_m определяется ее динамическим портретом $\pi(\tau_m)$ [7].

Динамический портрет $\pi(\tau_m)$ СВС представляет собой состояние множества позиций $\{p_{lnkj}^i(\tau_m), p_{Onkl}^i(\tau_m)\}$ сети Петри, определяющее выполнение переходов $t_{nk}^i \in \{t_{nk}^i\}$ сети Петри в момент времени τ_m :

$$\pi(\tau_m) = \{p_{lnkj}^i(\tau_m), p_{Onkl}^i(\tau_m)\}, \quad (27)$$

где $(i = \overline{1, I}), (n = \overline{1, N_i}), (k = \overline{1, K_n^i}), (j = \overline{1, J_{nk}^i}), (l = \overline{1, L_{nk}^i})$.

Множество переходов $\{t_{nk}^i\}$ сети Петри СВС состоит из множества переходов примитивных событий $\{t_{nk}^{iP}\}$, множества переходов начал непримитивных событий $\{t_{nk}^{iH}\}$ и множества переходов окончаний непримитивных событий $\{t_{nk}^{iO}\}$:

$$\{t_{nk}^i\} = \{t_{nk}^{iP}\} \cup \{t_{nk}^{iH}\} \cup \{t_{nk}^{iO}\}. \quad (28)$$

Характеристики переходов, модели представлены в табл. 1.

С учетом особенностей позиций и переходов сети Петри модели, выражение (27) можно представить в виде:

$$\pi(\tau_m) = \pi^I(\tau_m) \cup \pi^H(\tau_m) \cup \pi^O(\tau_m), \quad (29)$$

где $\pi^I(\tau_m) = \{p_{lnkj}^{iI}(\tau_m), p_{Onkl}^{iI}(\tau_m)\}$ – позиции примитивных переходов, $\pi^H(\tau_m) = \{p_{lnkj}^{iH}(\tau_m), p_{Onkl}^{iH}(\tau_m)\}$ – позиции начала непримитивных переходов, $\pi^O(\tau_m) = \{p_{lnkj}^{iO}(\tau_m), p_{Onkl}^{iO}(\tau_m)\}$ – позиции окончания непримитивных переходов, $(i \in \overline{1, I}), (n \in \overline{1, N_i}), (k \in \overline{1, K_n^i}), (j \in \overline{1, J_{nk}^i}), (l \in \overline{1, L_{nk}^i})$.

Таблица 1 – Характеристики переходов имитационной модели СВС

| Характеристики переходов сети Петри СВС | | | | | |
|---|---------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
| Примитивные события | | Непримитивные события | | | |
| Множество предусловий | Множество переходов | Начало непримитивного события | | Окончание непримитивного события | |
| | | Множество предусловий | Множество переходов | Множество предусловий | Множество переходов |
| $\{p_{lnkj}^{iI}(\tau_m)\}$ | $\{t_{nk}^{iI}\}$ | $\{p_{lnkj}^{iH}(\tau_m)\}$ | $\{t_{nk}^{iH}\}$ | $\{p_{Onkl}^{iO}(\tau_m)\}$ | $\{t_{nk}^{iO}\}$ |
| $\Delta t_{nk}^i = 0$ | | $\Delta t_{nk}^i \neq 0$ | | | |

Время между началом выполнения непримитивного перехода t_{nk}^{iH} и выполнением перехода окончания непримитивного события t_{nk}^{iO} – есть величина равная Δt_{nk}^i , это время определяется параметрами подсистем узлов (станций) и линий связи.

Выполнение хотя бы одного перехода $t_{nk}^i \in \{t_{nk}^i\}$, $(i \in \overline{1, I})$, $(n \in \overline{1, N_i})$, $(k \in \overline{1, K_n^i})$, при выполнении условий $\{p_{lnkj}^i(\tau_m), p_{Onkl}^i(\tau_m)\}$, $(i \in \overline{1, I})$, $(n \in \overline{1, N_i})$, $(k \in \overline{1, K_n^i})$, $(j \in \overline{1, J_{nk}^i})$, $(l \in \overline{1, L_{nk}^i})$ в момент τ_m за время $\delta\tau_m$ называется множеством реализаций переходов СВС, и будет обозначаться $\rho(\tau_m + \delta\tau_m) = \{t_{n^*k^*}^{i^*}\}$, а множество условий, осуществивших эту реализацию представим в виде:

$$\varepsilon(\tau_m + \delta\tau_m) = \{p_{ln^*k^*j^*}^{i^*}(\tau_m), p_{On^*k^*l^*}^{i^*}(\tau_m)\}, \quad (30)$$

где $(i^* \in \overline{1, I})$, $(n^* \in \overline{1, N_i})$, $(k^* \in \overline{1, K_n^i})$, $(j^* \in \overline{1, J_{nk}^i})$, $(l^* \in \overline{1, L_{nk}^i})$.

Рассмотрим, как могла бы реализоваться модель в классическом варианте выполнения сети Петри. Классические сети Петри, реализующие параллельные процессы, могут быть осуществлены заменой переходов сети физическими устройствами, выполняющими процедуру запуска переходов в соответствии с условиями, определяющими их реализацию. Если для множества переходов $\{t_{n^*k^*}^{i^*}\}$ осуществлено множество предусловий их выполнения $\{p_{ln^*k^*j^*}^{i^*}(\tau_m)\}$, то при этом произойдет изменение как самих предусловий $\{p_{ln^*k^*j^*}^{i^*}(\tau_m)\}$, так и связанных с этими переходами постусловий $\{p_{On^*k^*l^*}^{i^*}(\tau_m)\}$. На следующем шаге:

$$\{p_{ln^*k^*j^*}^{i^*}(\tau_{m+1})\} = \{p_{On^*k^*l^*}^{i^*}(\tau_m)\}, \quad (31)$$

и весь процесс выполнения сети Петри повторяется снова.

Для корректного выполнения сети Петри на однопроцессорном компьютере необходимо в момент времени τ_m проанализировать множество возможных реализаций переходов СВС $\rho(\tau_m + \delta\tau_m) = \{t_{n^*k^*}^{i^*}\}$, и множество условий, которые могут осуществить эту реализацию $\varepsilon(\tau_m + \delta\tau_m) = \{p_{ln^*k^*j^*}^{i^*}(\tau_m), p_{On^*k^*l^*}^{i^*}(\tau_m)\}$.

Множество возможных реализаций переходов сети $\rho(\tau_m + \delta\tau_m) = \{t_{n^*k^*}^{i^*}\}$ можно представить в виде:

$$\rho(\tau_m + \delta\tau_m) = \{t_{n^*k^*}^{i^*}\} = \{t_{n^*k^*}^{i^*P}\} \cup \{t_{n^*k^*}^{i^*H}\} \cup \{t_{n^*k^*}^{i^*O}\}. \quad (32)$$

Длительность примитивных событий, представляемых в сети Петри переходами $\{t_{n^*k^*}^{i^*P}\}$, равна нулю, и они не вносят вклад в расчет модельного времени. В результате циклического запуска переходов $\{t_{n^*k^*}^{i^*P}\}$ примитивных событий, остаются невыполненными только переходы непримитивных событий. Для выполнения непримитивных событий необходимо рассмотреть понятие очередной реализации СВС.

Пусть модель СВС, представленная сетью Петри, рассматривается на интервале времени $[\tau_m(\tau_m + \delta\tau_m)]$, когда в момент времени τ_m выполнены все переходы $\{t_{n^*k^*}^{i^*P}\}$ примитивных событий. За время $\delta\tau_m$ выполняется реализация $\rho^*(\tau_m + \delta\tau_m) = \{t_{n^*k^*}^{i^*}\}$ (состоящая из одного или нескольких выполненных переходов непримитивных событий) такая, что за время $\delta\tau_m$ в системе другие реализации не происходят, то $\rho^*(\tau_m + \delta\tau_m)$ будем называть очередной реализацией СВС для момента времени τ_m .

Заметим, что в общем случае за период $(\tau_m + \delta\tau_m)$ может выполняться несколько событий $\rho^*(\tau_m + \delta\tau_m)$.

Для нахождения времени $\delta\tau_{m+1}$ наступления очередной реализации непримитивного события в подсистемах узлов (станций) и линий связи относительно момента времени τ_m введем оператор $\Pi(\tau_m \{ \Delta\tau_{nk}^i, \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m) \} \pi(\tau_m))$, определяющий время $\delta\tau_m$ наступления очередной реализации в указанных подсистемах относительно времени τ_m , который определяется: модельным временем τ_m ; множеством времен выполнения непримитивных событий $\Delta\tau_{nk}^i$; множеством текущих времен выполнения непримитивных событий $\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m)$ и динамическим портретом $\pi(\tau_m)$ сети Петри СВС:

$$\delta\tau_{m+1} = \Pi(\tau_m \{ \Delta\tau_{nk}^i, \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m) \} \pi(\tau_m)), \quad (33)$$

$$\delta\tau_{m+1} = \min \{ \Delta\tau_{nk}^i, \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m) \} \quad (i = \overline{1, I}), \quad (n = \overline{1, N_i}), \quad (k = \overline{1, K_n^i}), \quad (34)$$

где $i(\tau_m) = \arg \min \{ \Delta\tau_{nk}^i, \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m) \}$ – номер рассматриваемого уровня детализации СВС, в котором очередная реализация события доставляет $\min \{ \Delta\tau_{nk}^i, \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m) \} \quad (i = \overline{1, I}), \quad (n = \overline{1, N_i}), \quad (k = \overline{1, K_n^i})$ в момент τ_m на отрезке $\delta\tau_{m+1}$; $n(\tau_m) = \arg \min \{ \Delta\tau_{nk}^i, \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m) \} \quad (i = \overline{1, I}), \quad (n = \overline{1, N_i}), \quad (k = \overline{1, K_n^i})$ в момент τ_m на отрезке $\delta\tau_{m+1}$; $\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_{m+1}) = \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m) - \delta\tau_{m+1}$, $\Delta\tau_{nk}^i(\tau_{m+1}) = \Delta\tau_{nk}^i(\tau_m) - \delta\tau_{m+1}$, $\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_{m+1}) = \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_{m+1}) \neq 0 \cup \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_{m+1}) \neq 0$

Это означает, что ближайшее событие, относительно момента τ_m , произойдет в переходе сети Петри $t_{n(\tau_m)k(\tau_m)}^{i(\tau_m)}$ в момент времени $\tau_{m+1} = \tau_m + \delta\tau_m$.

Пусть в начальный момент модельного времени τ_0 рассматривается функционирование СВС, представленное сетью Петри, известен динамический портрет $\pi(\tau_0)$ сети.

Анализируя и выполняя примитивные события сети Петри, получаем сеть Петри с возбужденными переходами непримитивных событий. При выполнении непримитивных событий определяем $\delta\tau_1$ – очередную реализацию переходов сети Петри описывающей СВС:

$\delta\tau_1 = \min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_0)\}\right)$ – первая очередная реализация сети Петри СВС;

$i^* \tau_0 = \arg \min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_0)\}\right)$ – номер рассматриваемого уровня объекта СВС, в котором очередная реализация непримитивного события доставляет $\min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_0)\}\right)$ в момент τ_0 на отрезке $\delta\tau_1$;

$n^* \tau_0 = \arg \min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_0)\}\right)$ – номер объекта СВС, в котором очередная реализация непримитивного события доставляет $\min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_0)\}\right)$ в момент τ_0 на отрезке $\delta\tau_1$;

$k^* \tau_0 = \arg \min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_0)\}\right)$ – номер перехода объекта, в котором достигается $\min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_0)\}\right)$ в момент τ_0 на отрезке $\delta\tau_1$.

При этом все портреты $\pi^H(\tau_0) = \{p_{lnkj}^{iH}(\tau_0), p_{Onkl}^{iH}(\tau_0), (\tau_0)\}$ и $\pi^O(\tau_0) = \{p_{lnkj}^{iO}(\tau_0), p_{Onkl}^{iO}(\tau_0), (\tau_0)\}$ не изменяются, кроме портретов $\pi^{*H}(\tau_0) = \{p_{ln^*k^*j^*}^{i^*H}(\tau_0), p_{On^*k^*l^*}^{i^*H}(\tau_0), (\tau_0)\}$ и $\pi^{*O}(\tau_0) = \{p_{ln^*k^*j^*}^{i^*O}(\tau_0), p_{On^*k^*l^*}^{i^*O}(\tau_0), (\tau_0)\}$, связанных с переходом $t_{n^*k^*}^{i^*}$, которые изменяются в момент модельного времени $\tau_1 = \tau_0 + \delta\tau_1$, ($i^* \in \overline{1, I}$), ($n^* \in \overline{1, N^i}$), ($k^* \in \overline{1, K_n^i}$), ($j^* \in \overline{1, J_{nk}^i}$), ($l^* \in \overline{1, L_{nk}^i}$).

Изменение портретов $\pi^{*H}(\tau_0)$ и $\pi^{*O}(\tau_0)$ определяется процедурами $p_{n^*k^*}^{i^*}$, выполнения множества реализаций переходов $\{t_{n^*k^*}^{i^*}\}$:

$$\begin{aligned} \pi^H(\tau_1) &= p_{n^*k^*}^{i^*H}(\pi^{*H}(\tau_1), (\tau_0)), \\ \pi^O(\tau_1) &= p_{n^*k^*}^{i^*O}(\pi^{*O}(\tau_1), (\tau_0)) \end{aligned} \quad (35)$$

После преобразования динамических портретов, выполняется изменение модельного времени $\tau_1 = \tau_0 + \delta\tau_1$.

Для второго очередного события имеем:

$$\begin{aligned} \delta\tau_2 &= \Pi\left(\tau_1 \left\{ \Delta\tau_{nk}^i \right\}, \left\{ \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_1) \right\}, \pi(\tau_1)\right), \\ \delta'\tau_2 &= \min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_1)\}\right), \\ i(\tau_2) &= \arg \min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_1)\}\right), \\ n(\tau_2) &= \arg \min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_1)\}\right), \\ k(\tau_2) &= \arg \min\left(\{\Delta\tau_{nk}^i\}, \{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_1)\}\right), \\ \pi^H(\tau_2) &= p_{n^*k^*}^{i^*H}(\pi^{*H}(\tau_1), (\tau_1)), \\ \pi^O(\tau_2) &= p_{n^*k^*}^{i^*O}(\pi^{*O}(\tau_1), (\tau_1)), \\ \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_2) &= \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_1) - \delta\tau_2, \\ \Delta\tau_{nk}^i(\tau_2) &= \Delta\tau_{nk}^i(\tau_1) - \delta\tau_2, \\ \left\{ \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_2) \right\} &= \left\{ \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_1) \neq 0 \right\} \cup \left\{ \Delta\tau_{nk}^i(\tau_1) \neq 0 \right\}, \\ \tau_1 &= \tau_0 + \delta\tau_1. \end{aligned}$$

Затем этот процесс повторяется на каждом шаге выполнения событий в имитационной модели до выполнения условий останова имитации.

Общий алгоритм динамического поведения имитационной модели СВС можно представить следующим образом. Для m -го очередного события имеем:

$$\delta\tau_{m+1} = \Pi\left(\tau_m \left\{ \Delta\tau_{nk}^i \right\}, \left\{ \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m) \right\}, \pi(\tau_m)\right),$$

$$\begin{aligned}\delta\tau_{m+1} &= \min\left(\left\{\Delta\tau_{nk}^i\right\}, \left\{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m)\right\}\right), \\ i(\tau_{m+1}) &= \arg \min\left(\left\{\Delta\tau_{nk}^i\right\}, \left\{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m)\right\}\right), \\ n(\tau_{m+1}) &= \arg \min\left(\left\{\Delta\tau_{nk}^i\right\}, \left\{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m)\right\}\right), \\ k(\tau_{m+1}) &= \arg \min\left(\left\{\Delta\tau_{nk}^i\right\}, \left\{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m)\right\}\right), \\ \pi^H(\tau_{m+1}) &= p_{n^*k^*}^{i^*H}(\pi^H(\tau_m), (\tau_m)), \\ \pi^O(\tau_{m+1}) &= p_{n^*k^*}^{i^*O}(\pi^O(\tau_m), (\tau_m)), \\ \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_{m+1}) &= \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_m) - \delta\tau_{m+1}, \\ \Delta\tau_{nk}^i(\tau_{m+1}) &= \Delta\tau_{nk}^i(\tau_m) - \delta\tau_{m+1}, \\ \overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_{m+1}) &= \left\{\overline{\Delta\tau_{nk}^i}(\tau_{m+1}) \neq 0\right\} \cup \left\{\Delta\tau_{nk}^i(\tau_{m+1}) \neq 0\right\} \\ \tau_{m+1} &= \tau_m + \delta\tau_{m+1}.\end{aligned}$$

Когда $\tau_m > \tau_{\max}$, τ_{\max} – время окончания имитации, процесс заканчивается. Моменты $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \dots$ изменения портретов СВС называются особыми состояниями. Изменения, происходящие в эти моменты, полностью определяют динамику модели сети. Именно последовательность указанных событий составляет сущность функционирования СВС.

В этом случае динамика модели фактически повторяет динамику сети, т. е. переход от одного события к другому, а соответствующая модель носит событийный характер. Приведенные выше выражения представляют описание динамического поведения имитационной модели СВС, представленной сетью Петри. При этом шаг модельного времени $\delta\tau_m$ зависит от очередного события модели СВС. Модель динамики особых состояний СВС предусматривает выполнение следующих действий (рис. 5): выбор событий в модели, которые необходимо обслужить или закончить при одном и том же модельном времени τ_m ; обслуживание событий, которые имеют минимальное время инициализации; по окончании обслуживания событий определение очередного значения модельного времени; корректировка модельного времени; проверка условий окончания моделирования либо по времени завершения имитации, либо по выполнению других событий в системе.

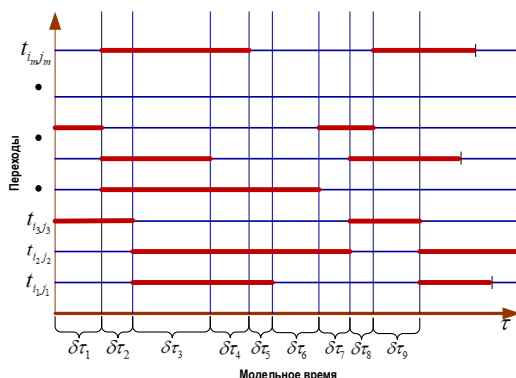


Рис. 5. Модель динамики особых состояний сети военной связи

Заключение

Имитационное математическое моделирование является довольно мощным инструментом системных исследований, вполне отвечающим тенденциям развития современных компьютерных технологий. Наряду с этим, этот вид моделирования достаточно сложен в своей практической реализации, требует больших временных затрат и предполагает достаточно высокую квалификацию исполнителей в области математики и программирования на компьютерах. К имитационным моделям следует обращаться тогда,

когда исследовательскую задачу невозможно сформулировать в виде аналитической математической модели или когда аналитические и численные решения становятся малоэффективными из-за их громоздкости и ограничений на вычислительные ресурсы.

Рассмотренный подход построения СВС показывает, что имитационное моделирование важно не только и не столько для получения количественных оценок, сколько для того, чтобы помочь исследователю (разработчику) разобраться в существе изучаемой (проектируемой) системы. Именно в этом заключается одна из важнейших функций математического имитационного моделирования.

Несомненно, что сети Петри, как инструмент исследования, позволяют адекватно описывать процессы функционирования весьма сложных многоуровневых иерархических систем, учитывать отличительные, индивидуальные особенности систем, позволяя при этом описывать асинхронность и параллелизм выполнения процессов и событий.

Литература

1. Моисеев А.А., Чуев А.В., Салюк Д.В., Киселев А.А. Инфокоммуникационная сеть, как объект системного анализа // Техника средств связи. 2019. № 1 (145). С. 150-158.
2. Каталевский Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. – М.: Издательский дом ДЕЛО, 2015. – 496 с.
3. Лескин А.А. и др. Сети Петри в моделировании и управлении. – Л.: Наука, 1989. – 133 с.
4. Бродский Ю.И. Распределенное имитационное моделирование сложных систем. Монография. – М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской Академии наук, 2010. – 156 с.
5. Булатов В.В. Введение в математические методы моделирования сложных систем. Монография. – М.: «ОнтоПринт», 2018. – 342 с.
6. Долгов А.И. Алгоритмизация прикладных задач. – М.: ФЛИНТА, 2016. – 136 с.
7. Трухин М.П. Моделирование сигналов и систем. Сетевые модели. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 204 с.

References

1. Moiseev A.A., Chuev A.V., Salyuk D.V., Kiselev A.A. Infokommunikacionnaja set', kak ob#ekt sistemnogo analiza [Infocommunication network, as an object of system analysis] // Communication technology. 2017 № 6 (145). 150-158 p. (In Russian). (in Russian).
2. Katalevskiy D.Yu. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii [Fundamentals of simulation and system analysis in management]. 2015. – 496 p (In Russian).
3. Leskin A.A et al. Seti Petri v modelirovanii i upravlenii [Petri nets in modeling and control]. – L.: Science, 1989. – 133 p. (In Russian).
4. Brodskiy Yu.I. Raspredelennoe imitacionnoe modelirovanie slozhnyh system [Distributed simulation modeling of complex systems]. Monograph. . – M.: Computing Center named. A.A. Dorodnitsa of the Russian Academy of Sciences, 2010. – 156 p. (In Russian).
5. Bulatov V.V. Vvedenie v matematicheskie metody modelirovaniya slozhnyh sistem [Introduction to mathematical methods for modeling complex systems]. Monograph.. – M.: «OntoPrint», 2018. – 342 p. (In Russian).
6. Dolgov A.I. Algoritmizacija prikladnyh zadach [Algorithmization of applied problems]. – M.: FLINTA, 2016. – 136 p. (In Russian).
7. Trukhin M.P. Modelirovanie signalov i sistem. Setevye modeli [Simulation of signals and systems. Network models]. – Yekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2018. – 204 p. (In Russian).

Статья поступила 05 июля 2019 г.

Информация об авторах

Моисеев Анатолий Алексеевич – Заместитель директора научно-технического центра ПАО «Интелтех». Кандидат военных наук, профессор. Тел.: +79112950761.

Чуев Александр Витальевич – Начальник отдела ПАО «Интелтех». Кандидат технических наук, доцент. Тел.: +79819782550.

Киселев Алексей Алексеевич – Начальник сектора ПАО «Интелтех». Кандидат технических наук, доцент. Тел.: +79119621460.

Миронов Анатолий Анатольевич – Инженер 1 категории ПАО «Интелтех». Кандидат технических наук, доцент. Тел.: +79110336753.

E-mail: saldiv@inteltech.ru. Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

Imitation model of military communication network

A.A. Moiseev, A.V. Chuev, A.A. Kiselev, A.A. Mironov

Annotation. *The core of the article for a comprehensive, comprehensive study of the network of military communications selected system analysis, on the basis of which the considered network includes subsystems: nodes (stations), lines, management, support, reserves. In the considered research task, it is very difficult to formulate an object in the form of an analytical mathematical model, and analytical and numerical solutions are ineffective due to their bulkiness and limitations on computational resources. On this basis, the sequence of development of a simulation mathematical model of a military communication network based on the principles of modularity and structural similarity is presented using the theory of Petri nets and their logical scheme of construction. To implement this approach, the following modeling steps were proposed: synthesis of the morphological structure of the simulation model, structurization of the simulation model, formalization and algorithmization of the model elements, development of descriptions of network positions and transitions, debugging and computer experiments. From the point of view of scientific problems, the first three stages, which are considered in detail in the article, are of the greatest interest. The most important function of mathematical simulation is not only and not so much getting quantitative estimates, but targeted assistance to the researcher (developer) to understand the essence of the system being studied (designed). This is reflected in an adequate reflection of the functioning of a complex multi-level hierarchical system, allowing you to take into account the distinctive, individual characteristics of the system and describe the asynchrony and parallelism of processes and events. The proposed approach creates the prerequisites for an objective view of real processes, focusing their attention not on particulars, but on regularities.*

Keywords: *military communications network, simulation model, Petri net, macro transition, primitive events, not primitive events, operator, elementary function, function tree.*

Information about Authors

Moiseev Anatoly Alekseevich - Deputy director of scientific and technical center of PJSC «Inteltech». Candidate of military sciences, professor. Tel. +79112950761.

Chuev Alexander Vitalevich - Head of section of PJSC «Inteltech». Candidate of engineering sciences, docent. Tel. +79819782550.

Kiselev Alexey Alekseevich - Head of sector of PJSC «Inteltech». Candidate of engineering sciences, docent. Tel. +79119621460.

Mironov Anatoly Anatolyevich - First category engineer of PJSC «Inteltech». Candidate of engineering sciences, docent. Tel. +79110336753.

E-mail: saldiv@inteltech.ru.

Address: Russia, 197342 Saint-Petersburg, Kantemirovskaya street 8.

Для цитирования: Моисеев А.А., Чуев А.В., Киселев А.А., Миронов А.А. Имитационная модель сети военной связи // Техника средств связи. 2019. № 3 (147). С. 53-69.

For citation: Moiseev A.A., Chuev A.V., Kiselev A.A., Mironov A.A. Imitation model of military communication network. Means of communication equipment. 2019. No 3 (147). P. 53-69. (In Russian).