

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА»

В.Д. ЕЛЕНЕВ, В.В. САЛМИН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ
АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

УДК 629.78:519.87 (075)
ББК 22.18:39.62
Е 504



**Инновационная образовательная программа
«Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий»**

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. А. А. Калентьев;
д-р техн. наук, проф. А. В. Соллогуб.

Е 504 **Еленев В.Д.**
**Использование сетевых моделей в задачах анализа процессов функциони-
рования космических аппаратов / В.Д.Еленев, В.В.Салмин. – Самара: Изд-во
Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. –54 с.: ил.**

ISBN 5-7883-0447-4

Приведены основные сведения по использованию сетевых моделей, в задачах анализа процессов функционирования сложных технических систем, к которым относятся и космические аппараты.

Показано, как может быть реализовано моделирование типовых операций процессов функционирования КА с помощью аппарата макро-Е-сетей и приведены соответствующие макро-Е-сетевые схемы моделей.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, изучающих дисциплины «Автоматизация проектирования и конструирования летательных аппаратов (специальности 160802 «Космические аппараты и разгонные блоки»), «Технологии системного моделирования» (специальности 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах»). Разработано на кафедре «Летательные аппараты».

УДК 629.78:519.87 (075)
ББК 22.18:39.62

ISBN 5-7883-0447-4

©.Еленев В.Д., Салмин В.В., 2006
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ФОРМАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	6
1.1. Формальное определение сетей Петри.....	11
1.2. Классификация сетей Петри.....	14
1.3. Числовые сети и их модификации.....	16
2. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КА	28
2.1. Задача выбора временного интервала.....	28
2.2. Задача анализа технического состояния БС (модель отказов).....	30
2.3. Процессы функционирования с резервированием.....	35
2.4. Задача учета временной последовательности накапливающихся отказов элементов бортовых систем.....	38
2.5. Задача использования разделяемого ресурса.....	43
2.6. Задача выбора наилучшего исхода при статистическом моделировании.....	46
3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	52

ПРЕДИСЛОВИЕ

В дисциплинах «Автоматизация проектирования и конструирования летательных аппаратов» (специальности 160802 «Космические аппараты и разгонные блоки»), «Технологии системного моделирования» (специальности 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах») одним из основных является раздел, в котором изучаются вопросы моделирования процессов функционирования сложных технических систем, к которым относятся и космические аппараты (КА).

Данное пособие содержит теоретический материал, знание которого необходимо при выполнении лабораторных работ по названным выше дисциплинам, а также курсовых и дипломных проектов.

В первой главе рассмотрены формальные средства описания процессов функционирования сложных технических систем. Особое внимание уделяется макро-Е-сетевым моделям, являющимся разновидностью сетей Петри.

Во второй главе рассмотрены типовые задачи, характерные для моделирования процессов функционирования КА. В качестве формального средства используются макро-Е-сетевые модели.

В третьей главе приведены вопросы для самопроверки, позволяющие оценить качество усвоения материала.

Научное редактирование изложенного в пособии материала выполнено Прохоровым А.Г. Электронный набор текста и рисунки подготовлены Панковым А.А.

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной чертой современной космической техники является тенденция создания КА с длительным сроком активного существования.

Для этапа проектирования жизненного цикла КА основу большинства методов анализа проектных вариантов составляют используемые показатели и модели процессов их функционирования, с помощью которых они вычисляются. Очевидно, что достоверность и точность проведения оценок при анализе проектных вариантов КА существенно зависит от информативности используемых при этом моделей процессов функционирования. Традиционно используемые в практике проектирования КА модели, основанные на логико-вероятностных подходах и методе «дерево отказов», а также жестко привязанные к выбранному показателю эффективности, не позволяют в полной мере учитывать многорежимность и, главное, циклограммы работы бортовых систем (БС).

Перспективным средством моделирования динамических систем с дискретными состояниями, к которым могут быть отнесены и КА, являются сетевые формальные системы, или сетевые формальные модели, предложенные рядом исследователей и научных коллективов для изучения распределенных, параллельных, асинхронных систем, интенсивно развивающиеся в настоящее время. Структурно такие модели эквивалентны ориентированным графам, вершинами или узлами которых служат некоторые абстрактные объекты с хорошо определенными свойствами. Отношения между этими объектами, выражаемые дугами графа, моделируют каналы связи между компонентами системы, представляемой сетью. Важное достоинство сетевых моделей - удобство выражения параллелизма и синхронизации событий и процессов.

1. ФОРМАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для успешного развития вопросов моделирования процессов функционирования таких сложных технических систем, как КА, существует необходимость построения обобщенных формальных моделей, которые могли бы быть использованы в качестве теоретического аппарата в задачах анализа и синтеза проектных вариантов. Для любой предметной области, в том числе и для области, связанной с оценкой эффективности функционирования КА, могут быть построены различные формальные модели.

В общем случае формальная модель процесса функционирования КА должна позволять представлять параллелизм и синхронизацию процессов, возникновение особых состояний (например, отказов элементов БС), предсказывать поведение описываемой системы и получать количественные характеристики выходных параметров.

При построении математических моделей процессов функционирования сложных технических систем можно выделить следующие основные подходы:

- непрерывно-детерминированный (например, дифференциальные уравнения);
- дискретно-детерминированный (конечные автоматы);
- дискретно-стохастический (вероятностные автоматы);
- непрерывно - стохастический (системы массового обслуживания);

- обобщенный или универсальный (агрегативные системы).

На рис. 1.1 отражены наиболее известные формальные модели, пригодные для исследования процессов функционирования КА, теоретический аппарат которых хорошо развит. Это конечные автоматы [2, 13], кусочно-линейные агрегаты [3-5] и стохастические сети [7, 11, 18, 19], сетевые модели [5,15, 20, 21].

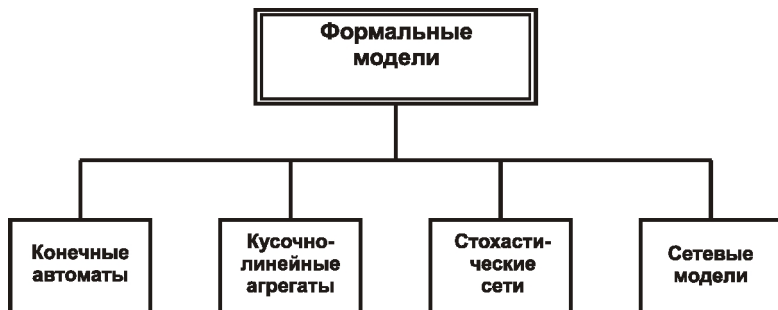


Рис. 1.1. Формальные модели описания процессов функционирования КА

Конечные автоматы. Конечный автомат – одна из наиболее фундаментальных формальных моделей, наиболее часто используемых в моделировании сложных технических систем. В общем случае конечный автомат можно представить в виде совокупности элементов: X – конечного множества входных сигналов; Y – конечного множества выходных сигналов; Z – конечного множества внутренних состояний; $z_0 \in Z$ – начального состояния; функции переходов $\varphi(x,z)$ и функции выхода $\psi(x,z)$, т.е. $F=(X,Y,Z,z_0, \varphi, \psi)$. Использование этой формальной модели для описания процессов функционирования КА затруднено из-за невозможности учета многорежимности и циклограмм работы БС. С помощью конечного автомата трудно также выразить иерархичность описываемой системы, и поэтому при достаточно большом числе состояний и входных воздействий в

рассматриваемой системе функции переходов и выхода могут оказаться чрезмерно сложными.

Кусочно-линейные агрегаты. Кусочно-линейные агрегаты как формальная модель были предложены Н.П.Бусленко [3-5] и являются наиболее общей схемой формализации широкого класса сложных технических систем. Эти модели позволяют описывать поведение непрерывных и дискретных, детерминированных и стохастических систем и базируются на понятии агрегативной системы. Любой агрегат рассматриваемой системы характеризуется следующими множествами: множеством моментов времени T , множеством входных сигналов X , множеством выходных сигналов Y , множеством состояний Z в каждый момент времени $t \in T$. Агрегат переходит из состояния $z(t_1)$ в состояние $z(t_2)$ за малый промежуток времени, т.е. имеет место скачок состояний δz . Переход агрегата из состояния $z(t_1)$ в состояние $z(t_2)$ происходит под действием внутренних параметров $h(t) \in H$ и входных сигналов $x(t) \in X$ с учетом случайных операторов V (описывающего случайный характер входного сигнала X) и U (описывающего случайный характер состояний агрегата в моменты времени между поступлениями входных сигналов). Для описания скачков состояний в особые моменты времени используется случайный оператор W , являющийся частным случаем оператора U . Во множестве состояний Z выделяется подмножество $Z^{(Y)}$ моментов выдачи выходных сигналов, определяемое случайным оператором G . Таким образом, агрегат определяется следующей упорядоченной совокупностью:

$$A = \{T, X, Y, Z, Z^{(Y)}, H, V, U, W, G\}. \quad (1.1)$$

Для описания взаимодействия агрегатов используется схема сопряжения R . Взаимодействие агрегатов осуществляется с использованием механизма обмена сигналами, передаваемыми по каналам связи. Важное достоинство кусочно-линейных агрегатов

заключается также в том, что они позволяют описывать системы в виде совокупности взаимодействующих подсистем. Несмотря на широкие возможности кусочно-линейных агрегатов, широкого применения в моделировании процессов функционирования КА они в настоящее время не получили ввиду отсутствия универсальной моделирующей системы, обеспечивающей в полной мере учет логики работы БС.

Стохастические сети. При использовании непрерывно-стохастического подхода к построению моделей сложных технических систем одной из наиболее распространенных формальных моделей являются стохастические сети. Структурными элементами стохастической сети служат системы массового обслуживания, называемые также Q -схемами [11, 17]. Динамическими объектами в стохастической сети являются запросы на обслуживание заявки. В элементарном акте обслуживания можно выделить две основные составляющие: ожидание обслуживания и собственно обслуживание заявки. Запросы последовательно перемещаются в сети по линиям связи до тех пор, пока не будут выполнены все этапы обслуживания каждого запроса. В общем случае Q -схема задается в виде совокупности

$$Q = \{W, U, H, Z, R, A\}, \quad (1.2)$$

где W - множество входящих потоков; U - множество потоков обслуживания; H - множество собственных параметров; Z - множество состояний; R - оператор сопряжения элементов системы (каналов и накопителей); A - оператор алгоритмов обслуживания.

Несмотря на широкие описательные возможности Q -схем и наличие множества языков имитационного моделирования (SIMULA, SIMSCRIPT, GPSS и др.) для их реализации, применение их для исследования процессов функционирования КА ограничено,

прежде всего из-за отсутствия возможности учета блокировок процессов в рассматриваемой системе, учета многорежимности и циклограмм работы БС.

Особый интерес для описания процессов функционирования КА представляют интенсивно развивающиеся в настоящее время сетевые формальные модели, используемые для изучения распределенных, параллельных, асинхронных систем. В основе этих формальных моделей лежат графовые методы алгоритмического описания параллельных процессов. Структурно эти модели эквивалентны ориентированным графам, вершинами которых служат некоторые абстрактные объекты с хорошо определенными свойствами. Отношения между этими объектами представляются дугами графа, моделирующими каналы связи между компонентами системы [11]. Важное достоинство сетевых моделей - удобство выражения параллелизма и синхронизации событий и процессов, а также простота формального описания.

При моделировании процессов функционирования КА, особенно связанных с анализом безопасности космического полета (БКП), широко используются также подходы, основанные на использовании логико-вероятностного метода, метода "дерева отказов", статистического метода анализа БКП [1].

Логико-вероятностный метод основывается на составлении логической функции условия достижения интересующего события (например, повреждения БС от действия неблагоприятных факторов (НФ)). Он сочетает в себе последовательное описание событий согласно определенной логике функционирования и определение вероятностей конечных событий через заданные условные вероятности.

Метод "дерева отказов" позволяет графически представить причинно-следственные связи между отказами элементов БС и анализируемым конечным состоянием БС и КА в целом. В "вершине" дерева с использованием логических условий

объединяются все "ветви", характеризующие события, связанные с получением конечного события.

К недостаткам метода относится его недостаточная универсальность при решении различных задач, так как логическое "дерево отказов" строится исходя из конкретных условий.

Статистический метод анализа БКП основан на использовании метода Монте-Карло. В рамках этого метода рассматриваемый процесс разбивается на элементарные операции, объединяемые логическими отношениями (операциями). С использованием заданных законов распределения разыгрываются текущие состояния, соответствующие элементарной операции. Проводится многократная имитация анализируемого процесса, после чего вычисляются статистические оценки. К недостаткам метода можно отнести неявную зависимость контролируемых характеристик от входных параметров.

1.1. Формальное определение сетей Петри

Развитие вычислительной техники и, в частности, появление возможности использования многопроцессорных систем обусловили поиск и разработку новых методов моделирования одновременной работы нескольких параллельных процессов, обеспечивающих при этом синхронизацию их функционирования.

Одним из наиболее эффективных способов описания параллельных процессов стали сети Петри, названные по имени немецкого ученого Карла-Адама Петри, впервые разработавшего их теорию в диссертационной работе "Взаимодействующие автоматы" [20, 21].

В настоящее время сети Петри получают широкое распространение в различных отраслях науки и техники, так как представляют собой перспективный инструмент описания и

исследования мультипрограммных, асинхронных, распределенных, параллельных, недетерминированных и/или стохастических систем обработки информации.

В общем случае сеть Петри представляет собой ориентированный граф с заданным начальным состоянием, называемым начальной разметкой (маркировкой) M .

Граф сети Петри является ориентированным взвешенным двудольным графом и включает вершины двух типов, называемые позициями (местами) и переходами. Дуги этого графа ведут либо из позиции p_1 в переход T_1 , либо из перехода T_1 в позицию p_2 (рис. 1.2, а).

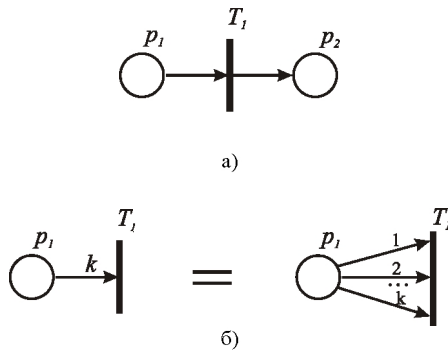


Рис. 1.2

При графическом представлении позиции обозначаются кружками, а переходы - жирными линиями или прямоугольниками. Дуги помечаются соответствующими весами (целыми положительными числами), и дугу с весом k можно считать эквивалентной k параллельным дугам (рис. 1.2, б). Дуга с весом $k=1$ на схеме не помечается.

Обычно в сетях Петри позициям соответствуют моделируемые состояния, а переходам – операции, связанные со сменой состояний.

Выполнение какого-либо условия в системе связано с появлением метки в соответствующей этому условию позиции сети. Разметка каждой позиции p ставит в соответствие целое неотрицательное число k . В этом случае говорят, что p размечено k метками. При графическом представлении сети Петри внутри позиции-кружка в этом случае помещают k черных точек (меток). При аналитическом описании разметка характеризуется вектором M длиной m , где m - общее число позиций.

Формально сеть Петри задается в виде множества:

$$PN = (P, T, K, W, M_0), \quad (1.3)$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ - множество позиций;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ - множество переходов;

$K = (P \times T) \cup (T \times P)$ - множество дуг;

$(P \times T)$ - подмножество дуг, идущих от позиций к переходам;

$(T \times P)$ - подмножество дуг, идущих от переходов к позициям;

$(P \times T) \cap (T \times P) = \emptyset$ и $(T \times P) \cap (P \times T) = \emptyset$;

$W: K \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ - весовая функция;

$M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ - начальная разметка.

Сеть Петри с заданной начальной разметкой обозначается двумя символами (N, M_0) .

Процесс функционирования многих систем можно описать в терминах состояний систем и изменения их состояний. При моделировании динамики системы состояния (или разметка сети Петри) сменяются согласно правилу перехода:

- переход разрешен, если все входные позиции p перехода помечены не менее чем $w(p, t)$ метками, где $w(p, t)$ - вес дуги, идущей из p в t ;
- запуск разрешенного перехода носит случайный характер (в зависимости от наступления или ненаступления соответствующего события);

- запущенный переход t изымает $w(p,t)$ меток из каждой своей входной позиции и добавляет $w(t,p)$ меток в каждую свою выходную позицию, где $w(t,p)$ - вес дуги, идущей из t в p .

Сеть Петри называется ординарной, или простой, если вес любой ее дуги равен 1.

1.2. Классификация сетей Петри

Отметим следующие важные достоинства сетей Петри как аппарата формализованного описания процессов функционирования КА.

1. *Простота представления параллелизма процессов и событий.* В сети Петри это свойство обеспечивается тем, что в каждый момент времени одновременно и независимо друг от друга могут сработать несколько переходов.

2. *Возможность иерархического описания систем.* Это свойство заключается в том, что любую вершину сети Петри (переход или позицию) можно развернуть в некоторую сеть или фрагмент сети или, наоборот, любую сеть Петри или ее фрагмент можно заменить более простой сетью, т.е. осуществить редукцию сети.

3. *Возможность синхронизации процессов.* Это свойство обеспечивается наличием в сети Петри условий на срабатывание переходов.

4. *Большая анализирующая мощность сетей Петри.* Данное свойство, в первую очередь, связано с тем, что для сети Петри возможно решение задач достижимости особых состояний.

Однако описательная мощность сетей Петри во многих случаях недостаточна для того, чтобы применять их в качестве аппарата для исследования таких сложных технических систем, которыми являются КА. В первую очередь это объясняется

отсутствием возможности описания детерминированных процессов. Аналогичные проблемы возникают и при рассмотрении задач моделирования с использованием аппарата теории сетей Петри в других предметных областях. Стремление адаптировать общую теории сетей Петри под практические задачи привело к возникновению большого семейства модификаций, получивших свои оригинальные названия: *E*-сети, макро-*E*-сети, цветные сети, оценочные сети, алгебраические сети, управляющие сети и многие другие [10, 12].

В связи с большим числом существующих модификаций сетей Петри при анализе их особенностей целесообразно использовать некоторую классификацию. При распределении сетей Петри на группы в качестве критерия классификации наиболее часто используют принципы построения алгоритмических моделей и принципы реализации вершин переходов и позиций в сетях. В этом случае можно выделить три основные группы сетей: оценочные сети Петри (*BPN*), числовые сети (*EN*) и макрочисловые сети (*MEN*), безопасные сети Петри (*SPN*).

Оценочные (ограниченные) сети Петри (*BPN*) характеризуются тем, что в вершинах позиций имеется целое число меток N ($N \geq 1$), а целочисленная оценочная дуга определяет количественное распределение меток в сети после прохождения их через вершины переходов (после срабатываний переходов).

Числовые сети (*EN*) и макрочисловые сети (*MEN*) - это сети, в которых вершины переходов подразделяются на несколько типов, каждый из которых срабатывает при определенном числе меток N в сети, а вершины макропереходов имеют возможность некоторого изменения своей структуры.

Безопасные сети Петри (*SPN*) отличаются тем, что при срабатывании переходов позиции могут содержать максимум одну метку.

1.3. Числовые сети и их модификации

Многочисленные исследования и накопленный опыт использования сетей Петри в различных предметных областях позволяют сделать заключение о том, что они являются одной из наиболее мощных формальных моделей динамических систем с дискретными событиями. При этом они позволяют формально доказывать ряд важных структурных и поведенческих свойств описываемых ими моделей систем, а также решать задачи достижимости, характеризующие наличие или отсутствие некоторых особых состояний моделируемой системы.

Для целей настоящего исследования в качестве формального аппарата описания и моделирования динамических систем с дискретными событиями выбраны макрочисловые сети, являющиеся расширением сетей Петри. Сохраняя основные достоинства сетей Петри, они обладают рядом дополнительных свойств, позволяющих использовать их в качестве развитого языка моделирования динамических систем с дискретными событиями.

Важной отличительной чертой макрочисловых сетей является то, что их структура носит модульный характер. Модульность заключается в том, что из всей совокупности элементов сетей Петри формируется некоторый набор базовых структур, описывающих переходы. Применение таких базовых структур, в общем случае, значительно облегчает процесс моделирования.

Рассмотрим более подробно одну из разновидностей макрочисловых сетей - макро-*E*-сети.

Формально макро-*E*-сеть определяется множеством [6]:

$$MEN=(P, T, K, S), \quad (1.4)$$

где $P=(p, r, Q)$ - конечное непустое множество позиций;

T - конечное непустое множество переходов;

K - множество дуг, связывающих между собой множества позиций и переходов;

$S=\{m,b,R,L\}$ - множество функциональных правил.

Элементы множества $P=\{p,r,Q\}$ называются: p - простыми позициями, r - решающими позициями, Q - макропозициями.

Множество переходов $T=\{T,E,A,F,J,T^{(c,g)},X,Y,RH\}$ описывает девять базовых структур переходов, которые подразделяются на простые переходы $T,E,A,F,J,T^{(c,g)}$ (табл. 1.1), макропереходы X и Y и диспетчер ресурсов RH (табл. 1.2).

Дуги $k \in K$ связывают вершины P и T по следующему правилу: начало и конец любой дуги соединяет только разноименные вершины P и T , т.е. $P \cap T = \emptyset$.

Функциональные правила $S=(m,b,R,L)$ включают разметочную функцию $m:P \rightarrow (0,1)$, функцию обозначения $b: T \rightarrow L$, решающую функцию R и используемый алфавит $L=U \cup V$, где U - входной, V - выходной алфавиты сигналов управления.

Разметочная функция m устанавливает в каждой позиции $p \in P$ в соответствии с правилом срабатывания переходов определенное число меток $\Sigma=(0,1)$.

Функция обозначения b показывает, какие входные сигналы U из внешней среды влияют на срабатывание переходов T и какие воздействия V формируются в сети в результате их срабатывания.

Решающая функция R позволяет указать позиции, от которых зависит срабатывание перехода T в рассматриваемый момент времени, и указать позиции, в которые должна перейти метка после его срабатывания.

Таблица 1.1


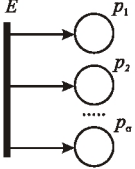
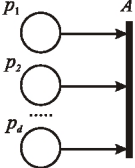
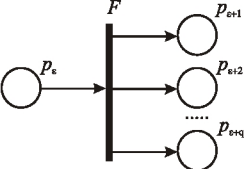
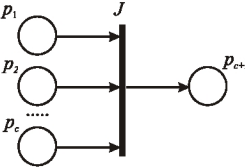
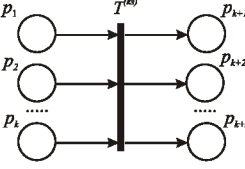
Тип перехода	Графическое изображение	Условие срабатывания	Изменение разметки
T- переход (исполнение)		$C_T = B(p_\varepsilon) \wedge \bar{B}(p_{\varepsilon+1})$	$m(p_\vartheta) = m(p_\vartheta) - 1,$ $m(p_{\varepsilon+1}) = m(p_{\varepsilon+1}) + 1$
E – переход (включение)		$C_E = \bar{B}(p_1) \wedge \bar{B}(p_2) \wedge \dots \bar{B}(p_\sigma)$	$m(p_\vartheta) = m(p_\vartheta) + 1,$ $i = 1, \dots, \sigma$
A – переход (выключение)		$C_A = B(p_1) \wedge B(p_2) \wedge \dots B(p_d)$	$m(p_\vartheta) = m(p_\vartheta) - 1,$ $i = 1, \dots, d$
F – переход (разветвление)		$C_F = B(p_\varepsilon) \wedge \bar{B}(p_{\varepsilon+1}) \wedge \dots \bar{B}(p_{\varepsilon+q})$	$m(p_\vartheta) = m(p_\vartheta) - 1,$ $m(p_{\varepsilon+i}) = m(p_{\varepsilon+i}) - 1,$ $i = 1, \dots, q$
J – переход (объединение)		$C_J = B(p_1) \wedge B(p_2) \wedge \dots B(p_c) \wedge \bar{B}(p_{c+j})$	$m(p_\vartheta) = m(p_\vartheta) - 1,$ $m(p_{c+i}) = 1,$ $i = 1, \dots, c$
$T^{(k,s)}$ – переход (перераспределение)		$C_{T^{(k,s)}} = B(p_1) \wedge B(p_2) \wedge \dots B(p_k) \wedge \bar{B}(p_{k+1}) \wedge \dots \bar{B}(p_{k+s})$	$m(p_\vartheta) = m(p_\vartheta) - 1,$ $i = 1, \dots, k,$ $m(p_{k+j}) = m(p_{k+j}) + 1,$ $j = 1, \dots, s$

Таблица 1.2.

Тип перехода	Графическое изображение	Условие срабатывания	Изменение разметки
$X^{(\varphi)}$ - переход (распределение)		$C_X = (B(p_\xi) \vee B(p_\psi)) \wedge \overline{B(p_{v+1})}$ $v = S_\xi(r), \quad \xi \in \{1, 2, \dots, v\},$ $\psi = S_\psi(r), \quad \varphi \in \{1, 2, \dots, v\}$	$m(p_i) = m(p_i) - 1,$ $m(p_\nu) = m(p_\nu) + 1,$ $v \in \{1, 2, \dots, q\},$ $m(p_\varphi) = m(p_\varphi) + 1,$ $\varphi \in \{1, 2, \dots, q\},$ $m(p_j) = m(p_j), j \neq \nu$ $j \neq \varphi, j = 1, 2, \dots, q$
$Y^{(\varphi)}$ переход (выбор)		$C_Y = (B(p_\xi) \vee B(p_\psi)) \wedge \overline{B(p_{v+1})}$ $v = S_\xi(r), \quad \xi \in \{1, 2, \dots, v\},$ $\psi = S_\psi(r), \quad \varphi \in \{1, 2, \dots, v\}$	$m(p_\nu) = m(p_\nu) - 1,$ $\xi \in \{1, 2, \dots, v\},$ $m(p_\varphi) = m(p_\varphi) - 1,$ $\psi \in \{1, 2, \dots, v\},$ $m(p_j) = m(p_j), j \neq \xi$ $j \neq \psi, j = 1, 2, \dots, v,$ $m(p_{v+1}) = m(p_{v+1}) + 1$

Простые позиции p_ε по своим функциональным особенностям играют ту же роль, что и позиции в сетях Петри. Их принципиальное отличие от позиций в сетях Петри заключается в том, что они могут содержать не более одной метки. В макро-Е-сетях решающие позиции r_s позволяют реализовать управление появлением меток в одной или нескольких простых позициях p_ε с помощью внутренних связей.

Макропозиции Q могут иметь некоторое заданное число признаков. Метки, попавшие в макропозицию Q , двигаются через

нее по определенному правилу, установленному при ее формировании. В макропозиции Q может находиться одновременно произвольное число меток, имеющих свои атрибуты. В основном Q -макропозиции применяются при необходимости накопления информации по результатам срабатывания переходов.

Диспетчер ресурсов RH позволяет управлять ресурсами, которые могут обслуживать многие требования E .

При срабатывании перехода T может формироваться сигнал управления V . Наличие сигналов U и V позволяет организовывать связь моделирующего алгоритма с каким-либо объектом управления.

Рассмотрим некоторые характерные особенности поведения основных компонентов макро- E -сетей. Ранее мы уже отмечали, что при моделировании процессов функционирования сложную техническую систему (в том числе и КА) можно рассматривать в виде динамической системы с дискретными состояниями. С учетом этого факта поведение структурных компонентов макро- E -сетей будем рассматривать как некоторую последовательность событий. Текущие состояния моделируемой системы при использовании макро- E -сетей будут характеризоваться совокупностью меток в позициях сети.

Метка – это некий динамический элемент, перемещающийся из одной позиции сети в другую в соответствии с правилами срабатывания переходов. В общем случае метка в макро- E -сети может иметь некоторый упорядоченный конечный набор (или кортеж) числовых атрибутов, определяющий ее информационное состояние:

$$V=(v_1, v_2, \dots, v_n),$$

где v_i – значение i -го атрибута. При этом каждый атрибут может иметь свой тип данных.

При моделировании процессов функционирования КА в соответствующих сетевых моделях с помощью атрибутов меток можно, например, задавать время ожидания вхождения КА в зону прямой видимости с НИП, вероятностные характеристики надежности элементов бортовых систем и т.д.

По сравнению с сетями Петри макро-*E*-сети имеют существенные отличия в правилах срабатывания переходов. Формально любой переход макро-*E*-сети описывается тройкой:

$$T = (\Sigma_t, \tau, \varphi),$$

где Σ_t – элементарная схема перехода t , задаваемая из базового набора переходов макро-*E*-сети (см. табл. 1.1, 1.2); τ – функция временной задержки срабатывания перехода; φ – процедура преобразования.

Функция временной задержки τ определяет интервал времени, в течение которого длится фаза активности перехода, после завершения которой происходит изменение разметки входных и выходных позиций перехода. Эта функция может иметь либо постоянное (в том числе и нулевое), либо переменное значение. Значение временной задержки может быть задано одним из следующих способов: по умолчанию (в этом случае она обычно имеет нулевое значение); с помощью атрибутов меток входных позиций перехода; через глобальные переменные макро-*E*-сети.

Процедура преобразования φ представляет собой последовательность операций, связанных с определением атрибутов меток выходных позиций перехода. Исходной информацией для этого служат атрибуты меток входных позиций либо используются данные, заложенные в программные модули перехода.

Рассмотрим правила срабатывания переходов. Для записи условий срабатывания переходов введем в рассмотрение предикат:

$$B(p) = \begin{cases} 0, & \text{если позиция } p \text{ не содержит метку,} \\ 1, & \text{если позиция } p \text{ содержит метку.} \end{cases} \quad (1.5)$$

Тогда условие срабатывания перехода t можно записать в форме логического выражения, в соответствии с которым переход срабатывает тогда, когда соответствующее ему логическое выражение истинно. Например, условие, что переход срабатывает при наличии метки во входной позиции p_ε и отсутствии ее в выходной позиции $p_{\varepsilon+1}$, будет выглядеть следующим образом:

$$C_t = B(p_\varepsilon) \wedge \bar{B}(p_{\varepsilon+1}).$$

В соответствии с (1.5) правила срабатывания простых переходов будут следующими.

Переход исполнения (простой переход) T срабатывает, если во входной позиции p_ε находится метка, а в выходной позиции $p_{\varepsilon+1}$ она отсутствует, т.е. условие срабатывания перехода имеет вид:

$$C_T = B(p_\varepsilon) \wedge \bar{B}(p_{\varepsilon+1}).$$

При срабатывании перехода T перемещение меток (изменение разметки) происходит по следующему правилу:

$$m'(p_\varepsilon) = m(p_\varepsilon) - 1,$$

$$m'(p_{\varepsilon+1}) = m(p_{\varepsilon+1}) + 1.$$

Здесь и далее $m(p)$ и $m'(p)$ соответствуют маркировке позиций до и после срабатывания рассматриваемого перехода.

Переход включения E срабатывает, если выполнена процедура пуска алгоритма, а в выходных позициях $p_1, p_2, \dots, p_\sigma$ нет меток:

$$C_E = \bar{B}(p_1) \wedge \bar{B}(p_2) \wedge \dots \wedge \bar{B}(p_\sigma).$$

После срабатывания перехода изменение разметки выходных позиций происходит по правилу:

$$m'(p_i) = m(p_i) + 1, \quad i = 1, \dots, \sigma.$$

Переход выключения A срабатывает, когда во всех входных позициях p_1, p_2, \dots, p_d находятся метки ($m(p_i) = 1, i = 1, \dots, d$):

$$C_A = B(p_1) \wedge B(p_2) \wedge \dots \wedge B(p_d).$$

После срабатывания перехода изменение разметки выходных позиций p_1, p_2, \dots, p_d происходит по правилу:

$$m'(p_i) = m(p_i) - 1, \quad i = 1, \dots, d.$$

Переход разветвления F срабатывает, когда во входной позиции p_ε появляется метка, а в выходных позициях $p_{\varepsilon+1}, p_{\varepsilon+2}, \dots, p_{\varepsilon+q}$ их нет ($m(p_\varepsilon) = 1, m(p_{\varepsilon+i}) = 0, i = 1, \dots, q$). После срабатывания перехода во всех выходных позициях появляется по одной метке, а из входной позиции она изымается, т.е.:

$$C_F = B(p_\varepsilon) \wedge \overline{B}(p_{\varepsilon+1}) \wedge \dots \wedge \overline{B}(p_{\varepsilon+q}),$$

$$m'(p_\varepsilon) = m(p_\varepsilon) - 1,$$

$$m'(p_{\varepsilon+i}) = m(p_{\varepsilon+i}) + 1, \quad i = 1, \dots, q.$$

Переход объединения J срабатывает в том случае, когда входные позиции p_1, p_2, \dots, p_c содержат метки, а в выходной позиции p_{c+1} метки нет:

$$m(p_i) = 1, \quad i = 1, \dots, c,$$

$$m(p_{c+1}) = 0.$$

После срабатывания перехода из входных позиций метки изымаются, а в выходную позицию метка добавляется. Условие срабатывания перехода и изменение разметки можно описать как

$$C_j = B(p_1) \wedge B(p_2) \wedge \dots \wedge B(p_c) \wedge \overline{B}(p_{c+1}),$$

$$m'(p_i) = m(p_i) - 1, \quad i = 1, \dots, c,$$

$$m'(p_{c+1}) = 1.$$

Переход перераспределения $T^{(k,s)}$ срабатывает при условии, что во всех входных позициях p_1, p_2, \dots, p_k находятся метки, а в выходных позициях $p_{k+1}, p_{k+2}, \dots, p_{k+s}$ их нет. После срабатывания перехода перераспределения из всех входных позиций метки изымаются, а во всех выходных позициях они появляются. Условие срабатывания перехода и изменение разметки можно описать следующим образом:

$$C_{T(c,q)} = B(p_1) \wedge B(p_2) \wedge \dots \wedge B(p_k) \wedge \bar{B}(p_{k+1}) \wedge \bar{B}(p_{k+2}) \wedge \dots \wedge \bar{B}(p_{k+s}),$$

$$m'(p_i) = m(p_i) - 1, \quad i = 1, \dots, k,$$

$$m'(p_{k+j}) = m(p_{k+j}) + 1, \quad j = 1, \dots, s.$$

Особенностью макропереходов является то, что одной из их входных позиций является управляющая позиция r , с помощью которой определяется алгоритм перемещения меток после срабатывания перехода. Макропереходы (см. табл. 1.2) будут иметь следующие правила срабатывания.

Макропереход распределения $X^{(q)}$. Условие срабатывания этого перехода имеет вид:

$$C_X = B(p_1) \wedge (\bar{B}(p_\nu) \vee \bar{B}(p_\varphi)),$$

$$\nu = S_\nu(r), \quad \nu \in \{1, 2, \dots, q\}, \quad \varphi = S_\varphi(r), \quad \varphi \in \{1, 2, \dots, q\},$$

где $S_\nu(r)$ и $S_\varphi(r)$ – состояния управляющей позиции r , вычисленные с помощью ассоциированной с r управляющей процедуры. Отличительной особенностью макроперехода $X^{(q)}$ от перехода F является то, что метка из позиции p_1 в зависимости от значения управляющей процедуры $r = \nu\varphi$ может перейти или в позицию p_ν , или в позиции p_ν и p_φ .

Алгоритм изменения маркировки позиций в конце фазы активности сработавшего перехода имеет вид:

$$m'(p_1) = m(p_1) - 1,$$

$$m'(p_\nu) = m(p_\nu) + 1, \quad \nu \in \{1, 2, \dots, q\},$$

$$m'(p_\varphi) = m(p_\varphi) + 1, \quad \varphi \in \{1, 2, \dots, q\},$$

$$m'(p_j) = m(p_j), \quad j \neq \nu \text{ и } j \neq \varphi, \quad j = 1, 2, \dots, q.$$

Особенность срабатывания макроперехода $X^{(q)}$ состоит в следующем. Необходимым условием срабатывания макроперехода $X^{(q)}$ является условие наличия метки во входной позиции ($B(p_1) = 1$). Если оно выполняется, то проверяется условие отсутствия меток в выходных позициях ($\bar{B}(p_\nu) = 1 \vee \bar{B}(p_\varphi) = 1$). Эта проверка осуществ-

ляется путем выполнения управляющей процедуры, ассоциированной с позицией r данного перехода.

Множество состояний управляющей позиции r состоит из целых неотрицательных чисел $z=\{0,1,2,\dots,q\}$, где q – число выходных позиций, а 0 – неопределенное состояние.

Для макро- E -сети возможны две реализации управляющей процедуры позиции r : программируемая и стандартная.

Для программируемой реализации в результате выполнения управляющей процедуры программным путем будут вычислены некоторые состояния $\nu=S_\nu(r)$ и $\varphi=S_\varphi(r)$ управляющей позиции r . Если $\nu=0$ и $\varphi=0$ (состояния управляющей позиции неопределенные), то переход оказывается во взведенном состоянии (не срабатывает). Условие истинности выражения $B(p_1) \wedge (\overline{B(p_\nu)} \vee \overline{B(p_\varphi)})$ будет достигаться только при $\nu \in \{1, 2, \dots, q\}$ или $\varphi \in \{1, 2, \dots, q\}$. Результат вычисления управляющей процедуры используется для выделения выходных позиций, которые участвуют в операции перемещения меток.

При стандартной управляющей процедуре вычисляется состояние управляющей позиции по фиксированному алгоритму:

$$S(r) = \nu, \nu = \{1, 2, \dots, q\},$$

где ν - индекс первой свободной выходной позиции (простой или макропозиции) при просмотре позиций в порядке возрастания их индекса ν , начиная с 1. Таким образом, стандартная управляющая процедура обеспечивает перемещение метки из входной позиции в первую свободную выходную позицию.

Макропереход выбора $Y^{(\nu)}$. Условие срабатывания этого перехода имеет вид:

$$CY = (B(p_\xi) \vee B(p_\psi)) \wedge \overline{B(p_{\nu+1})},$$

$$\nu = S_\xi(r), \xi \in \{1, 2, \dots, \nu\}, \psi = S_\psi(r), \varphi \in \{1, 2, \dots, \nu\},$$

где $S_\xi(r)$ и $S_\psi(r)$ – состояния управляющей позиции r , вычисленные с помощью ассоциированной с r управляющей процедуры.

Алгоритм изменения маркировки позиций в конце фазы активности сработавшего перехода имеет вид:

$$\begin{aligned} m'(p_\xi) &= m(p_\xi) - 1, \quad \xi \in \{1, 2, \dots, v\}, \\ m'(p_\psi) &= m(p_\psi) - 1, \quad \psi \in \{1, 2, \dots, v\}, \\ m'(p_j) &= m(p_j), \quad j \neq \xi \text{ и } j \neq \psi, \quad j = 1, 2, \dots, v, \\ m'(p_{v+1}) &= m(p_{v+1}) + 1. \end{aligned}$$

Особенность срабатывания макроперехода $Y^{(v)}$ состоит в следующем. Необходимым условием срабатывания макроперехода $Y^{(v)}$ является условие наличия метки в выходной позиции ($B(p_{v+1}) = 1$). Если оно выполняется, то проверяется условие наличия меток во входных позициях $(B(p_\xi) \vee B(p_\psi)) = 1$. Эта проверка осуществляется путем выполнения управляющей процедуры, ассоциированной с позицией r данного перехода.

Для макроперехода $Y^{(v)}$ так же, как и в предыдущем случае, множество состояний управляющей позиции состоит из целых неотрицательных чисел $z = \{0, 1, 2, \dots, v\}$, где v – число входных позиций, 0 – неопределенное состояние.

В результате выполнения программируемой управляющей процедуры будут вычислены некоторые состояния $\xi = S_\xi(r)$ и $\psi = S_\psi(r)$ управляющей позиции r . Если $\xi = 0$ и $\psi = 0$ (состояния управляющей позиций неопределенные), то переход оказывается во взведенном состоянии (не срабатывает). Условие истинности выражения $(B(p_\xi) \vee B(p_\psi)) \wedge \bar{B}(p_{v+1})$ будет достигаться только при $\xi \in \{1, 2, \dots, q\}$ или $\xi \in \{1, 2, \dots, q\}$ и $\psi \in \{1, 2, \dots, q\}$. Результат вычисления управляющей процедуры используется для выделения выходных позиций, которые участвуют в операции перемещения меток.

Аналогично макропереходу $X^{(q)}$ в макропереходе $Y^{(v)}$ может быть также использована стандартная управляющая процедура, которая вычисляет состояние управляющей позиции по фиксированному алгоритму:

$$S(r) = \xi, \quad \xi = \{1, 2, \dots, v\},$$

где ξ - индекс первой свободной входной позиции (простой или макропозиции) при просмотре позиций в порядке возрастания их индекса ξ , начиная с 1. Таким образом, стандартная управляющая процедура обеспечивает выбор метки из первой занятой входной позиции и перемещение ее в выходную позицию.

2. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КА

Рассмотрим несколько типовых задач, характерных для моделирования процессов функционирования КА [8,9,22].

2.1. Задача выбора временного интервала

Эта задача наиболее характерна для случая моделирования дискретно работающих БС КА. Будем задавать циклограмму работы БС в виде последовательностей моментов времени t_i^H, t_i^K - соответственно i -го включения и отключения БС. На некоторый заданный момент времени t^* требуется выбрать интервал времени которому принадлежит t^* или ближайший интервал $[t_i^H, t_i^K]$, для которого $t^* \leq t_i^H$. Во втором случае требуется определить временную задержку $\Delta t = t_i^H - t^*$.

На рис. 1.1 приведена структурная схема макро- E -сетевой модели задачи выбора временного интервала.

В данной модели наличие метки в позиции p_i ассоциируется с началом процедуры выбора временного интервала. Атрибут метки v_i этой позиции соответствует значению времени t^* . Изначально в управляющую процедуру перехода X_2 вводятся данные циклограммы работы БС и значение счетчика текущего интервала устанавливается равным $i=1$.

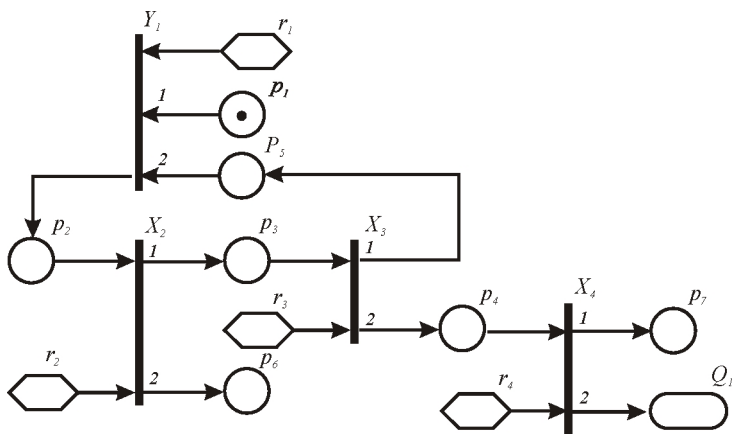


Рис. 2.1 - Структурная схема макро-Е-сетевой модели задачи выбора временного интервала

В случае одновременного наличия меток в позициях p_1 и p_4 при срабатывании перехода Y_1 метка изымается из позиции p_1 . Эта ситуация может возникнуть при повторном обращении к сетевой модели с новым значением времени t^* .

На базе переходов Y_1, X_2, X_3 организовано циклическое формирование последовательности времен t_i^H, t_i^K соответственно i -го включения и отключения БС на основе заданной штатной циклограммы (ассоциируется с заложенной на борту КА рабочей программой). На переходе X_2 с помощью управляющей процедуры решающей позиции r_1 происходит проверка окончания циклического перебора рассматриваемых временных интервалов.

В случае окончания перебора при срабатывании перехода X_2 метка передается в позицию p_3 (дуга 2) и дальнейшее срабатывание перехода становится невозможным. При выборе очередного временного интервала (перемещение метки в позицию p_2 по дуге 1) происходит инициация перехода F_1 и определение моментов

времени t_i^h, t_i^k - соответственно i -го включения и отключения БС. Эти значения присваиваются атрибутам (N_1, N_2) метки в позиции p_4 . На переходе X_2 проверяется условие $t^* \in [t_i^h, t_i^k]$. Если оно выполняется, то атрибутам метки в позиции p_5 присваиваются значения: $N_1 = \max(t^*, t_i^h)$, $N_2 = t_i^k$. Если оно не выполняется, то формируется задержка $\Delta t = t_i^h - t^*$ на срабатывание перехода X_2 .

Макропозиция Q_1 используется для подсчета общего числа прошедших временных интервалов.

Возможности приведенной типовой макро- E -сетевой модели задачи выбора временного интервала могут быть расширены, если на переходе X_1 обеспечить учет рассогласования работы системы синхронизации бортовой шкалы времени (которое приводит к сдвигу временных интервалов выдачи команд).

2.2. Задача анализа технического состояния БС (модель отказов)

При моделировании процессов функционирования КА часто бывает необходимо проводить проверку технического состояния БС в некоторый фиксированный момент времени t^* . В общем случае эта задача решается с учетом циклограмм работы БС и заданных вероятностей отказов элементов БС или всей БС в целом.

При этом учитываются следующие особенности:

- из общего множества бортовых систем W одновременно работает лишь небольшая часть, а остальные БС работают периодически или эпизодически;
- появление аварийной или нештатной ситуации может произойти только по причине отказа элементов тех систем, которые принадлежат на данный момент времени t^* множеству работающих систем $W_p \in W$.

В модели отказов необходимо обеспечить установление факта пребывания j -й БС в момент времени t^* во включенном состоянии. Для этого с использованием циклограммы работы БС проводится проверка выполнения условия попадания текущего времени t^* на i -е включение j -й БС: $t_{ji}^H \leq t^* \leq t_{ji}^K$, где t_{ji}^H, t_{ji}^K - соответственно моменты времени i -го включения и отключения j -й БС.

Для проведения такой проверки может быть использована сетевая модель, рассмотренная выше.

Вероятности отказов элементов БС, связанные с влиянием внутренних факторов, задаются обычно с помощью λ -характеристик и определяются одинаково на всем интервале активного существования КА. Учет влияния внешних НФ на отказы элементов БС проводится, как правило, в некоторые специфические интервалы времени, связанные с воздействием этих НФ. Поскольку нет корреляции между отказами элементов от этих двух групп НФ, то рассмотрим общую схему анализа технического состояния БС. В случае необходимости учета в модели функционирования обеих групп НФ это можно осуществить с помощью двух аналогичных блоков, в которых заложена разная логика вычисления вероятностей отказов элементов БС, или можно усложнить процедуру разыгрывания технического состояния элементов внутри сетевой модели.

Пример сетевой модели проверки технического состояния бортовой системы приведен на рис. 2.2.

В состав сетевой модели входят переходы X_1, X_2, Y_1 , позиции p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 , макропозиция Q_1 и решающие позиции r_1, r_2, r_3 .

Поступление команды на проверку технического состояния ассоциируется с наличием метки в позиции p_1 .

Переходы Y_1, X_1, X_2 , образуют цикл для проверки поочередно технического состояния всех элементов БС. На переходе Y_1 разыгрывается состояние текущего элемента по заданной или

вычисляемой (как функция времени) вероятности безотказной работы.

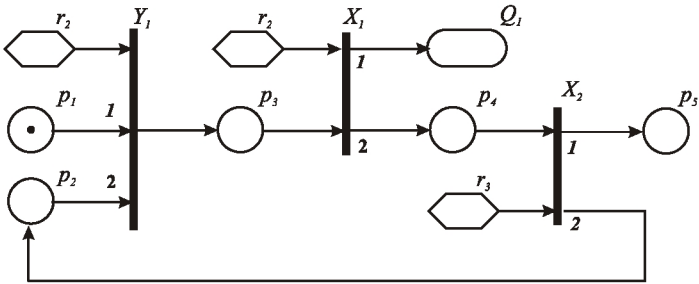


Рис. 2.2 - Макро-Е-сетевая схема модели проверки технического состояния БС

Переход Y_1 активизируется при первом срабатывании при условии наличия метки в позиции p_1 и при последующих срабатываниях – в позиции p_2 . Эту функцию выбора обеспечивает решающая позиция r_1 .

На переходе X_1 при наличии отказа одного из элементов цикл разрывается и метка поступает в макропозицию Q_1 , в результате чего в позицию p_5 метка не попадает и это ассоциируется с неработоспособным состоянием системы.

При отсутствии отказа элемента решающая позиция r_2 обеспечивает при срабатывании перехода X_1 перемещение метки в позицию p_4 .

На переходе X_2 проводится проверка окончания перебора всех элементов. Если все элементы проверены, то решающая позиция r_3 передает метку в позицию p_5 , в противном случае в позицию p_2 , т.е. цикл повторяется и проверке подвергается следующий элемент.

Попадание метки в позицию p_5 завершает цикл проверки технического состояния всех элементов и характеризует безопасную работу БС.

При статистическом варианте использования сетевой модели с помощью макропозиции Q_1 может быть подсчитано общее число отказов элементов.

Свойства приведенной модели могут быть расширены, если учитывать возможность восстановления работоспособности элементов после их повреждения. Вариант соответствующей сетевой модели приведен на рис. 2.3.

Здесь после срабатывания перехода X_1 метка перемещается в позицию p_7 , если элемент не поврежден, или в позицию p_4 , если имеет место его повреждение.

На переходе X_2 с помощью решающей процедуры позиции r_3 проводится анализ возможности восстановления свойств поврежденного элемента и определения для этого случая времени его восстановления. Если работоспособность элемента может быть восстановлена, то метка передается в позицию p_6 , в противном случае - в макропозицию Q_1 .

Переход Y_2 срабатывает при наличии метки в позиции p_6 или p_7 .

На переходе X_3 , как и для случая модели без учета возможности восстановления работоспособности элементов, проводится проверка окончания перебора всех элементов. Если все элементы проверены, то решающая позиция r_5 передает метку в позицию p_5 , в противном случае в позицию p_2 , т.е. цикл повторяется и проверке подвергается следующий элемент.

Попадание метки в позицию p_5 завершает цикл проверки технического состояния всех элементов и характеризует работоспособное техническое состояние БС.

Атрибуту метки позиции p_5 присваивается значение, равное максимальному времени восстановления работоспособности элементов системы (если такие отказы были у нескольких элементов).

2.3. Процессы функционирования с резервированием

Для КА характерно резервирование (дублирование) наиболее ответственных систем и элементов, позволяющее повысить общую надежность системы. При этом можно выделить структурное резервирование, когда параллельно с основными системами на борт устанавливаются резервные системы, включаемые в работу в случае выхода из строя основной системы, и функциональное резервирование, когда в случае отказа какой-либо системы ее функции частично или полностью выполняются другими системами.

Рассмотрим, как резервирование может быть учтено в макро-*E*-сетевых моделях.

Структурное резервирование может иметь два основных варианта:

- основная и резервные системы являются идентичными и логика работы их моделей одинакова;
- структуры и логики работы моделей основной и резервных систем отличаются друг от друга.

В случае, когда резервирование осуществляется системами, идентичными основной, то в макро-*E*-сетевой модели (рис. 2.4.) можно использовать один контур для описания процесса (переход T_1).

Появление метки в позиции p_1 характеризует условие начала моделирования процесса. На переходе Y_1 проверяется условие работоспособности основной (наличие метки в позиции p_2) и резервной (наличие метки в позиции p_3) систем. При срабатывании перехода Y_1 приоритет отдается основной системе. И только если эта система неработоспособна, по переходу Y_1 сработает при условии работоспособности резервной системы.

Появление метки в позиции p_4 свидетельствует о работоспособном состоянии одной из систем. В случае, если в это

время есть запрос на моделирование процесса (наличие метки в позиции p_1), переход J_1 срабатывает.

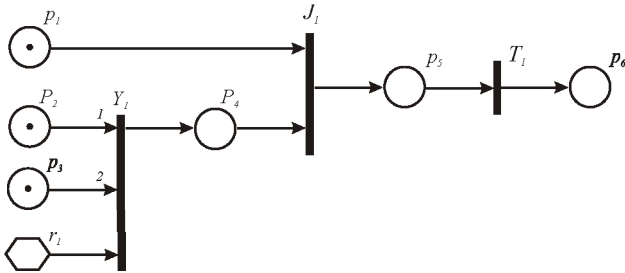


Рис. 2.4 - Макро-*E*-сетевая схема модели структурного резервирования с одинаковыми основной и резервной системами

Переход T_1 характеризует собственный процесс функционирования БС, и в практической реализации он развернется в отдельную макро-*E*-сетевую модель.

После срабатывания перехода T_1 атрибуту метки p_6 будет присвоен признак, описывающий, какая из систем участвовала в процессе функционирования.

Вариант макро-*E*-сетевой схемы модели структурного резервирования с отличающимися контурами основной и резервных систем приведен на рис. 2.5.

В этой схеме рассматривается случай основной системы (процесс функционирования ассоциируется с переходом T_1) и двух резервных систем (процессы функционирования которых ассоциируются с переходами T_2 и T_3).

Управляющая процедура позиции r_1 определяет, по какому контуру будет проводиться моделирование рассматриваемого процесса. В случае работоспособности всех систем (наличие меток в позициях p_2, p_3, p_4) приоритет отдается основной системе.

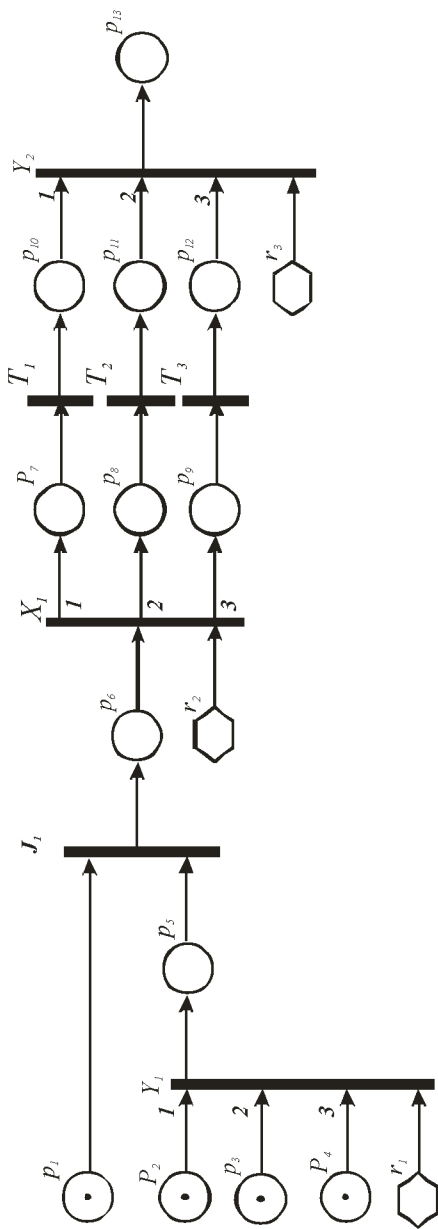


Рис. 2.5 - Макро-*E*-сетевая схема модели структурного резервирования с отличающимися контурами основной и резервных систем

Переход X_1 обеспечивает разветвление вариантов моделирования в зависимости от значения управляющей процедуры позиции r_1 .

Переход Y_2 срабатывает при условии появлении метки в позиции, соответствующей выбранному контуру моделирования. После срабатывания перехода в позицию p_{13} передается метка, одним из атрибутов которой является номер системы, обеспечивающей процесс функционирования.

Макро-Е-сетевая схема модели, описывающей функциональное резервирование, будет выглядеть аналогично модели структурного резервирования с отличающимися контурами основной и резервных систем (рис. 2.6). В этой схеме переход T_1 ассоциируется с процессом функционирования основной БС, а переход T_2 - с процессом функционирования БС, компенсирующей отказ основной БС.

В этой схеме метке позиции p_{10} целесообразно присвоить атрибуты, характеризующие вариант функционирования и количественные характеристики контролируемых параметров процесса.

2.4. Задача учета временной последовательности накапливающихся отказов элементов бортовых систем

Как отмечается во многих работах по теории надежности и оценке эффективности функционирования технических систем, учет временной последовательности отказов элементов – одна из наиболее актуальных и трудно реализуемых задач.

Динамика наступления отказов элементов играет существенную роль в исследовании процессов функционирования технических систем [14, 16].

Рассмотрим наиболее простой случай структурного резервирования систем (рис. 2.7).

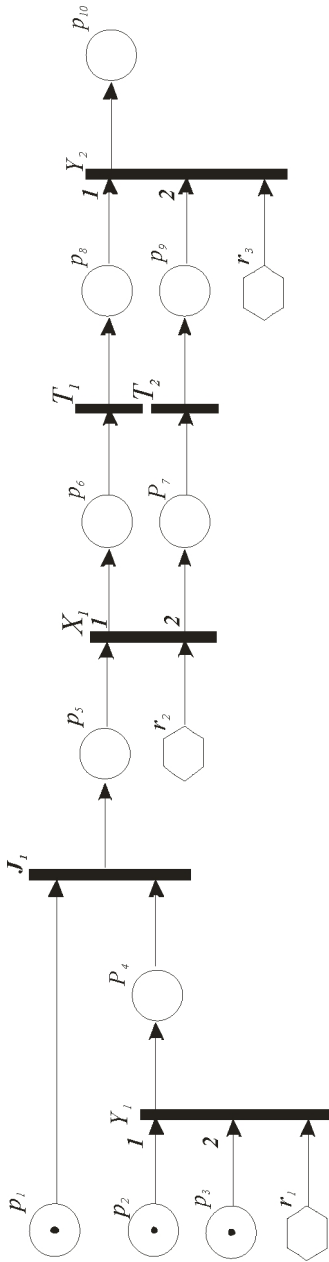


Рис. 2.6 - Макро-*E*-сетевая схема модели функционального резервирования систем

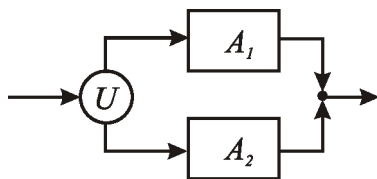


Рис. 2.7

Имеется система, в которой элемент A_1 имеет резервный элемент A_2 . В случае отказа элемента A_1 с помощью переключателя U в рассматриваемой системе в работу включается элемент A_2 . Здесь важным является условие, в какой последовательности могут произойти отказы элементов A_1 и U . Если первым откажет элемент A_1 , то система переключится на работу с резервным элементом A_2 . Последующий отказ элемента U не окажет влияния на работоспособность всей системы. Если же первым откажет элемент U , то система не сможет переключиться на работу с резервным элементом A_2 и окажется в неработоспособном состоянии.

Временная последовательность отказов элементов легко учитывается в макро- E -сетевых моделях процессов функционирования, так как в них динамика смены состояний может быть непосредственно увязана с временным фактором.

Для рассматриваемого примера можно воспользоваться макро- E -сетевой схемой, приведенной на рис. 2.8.

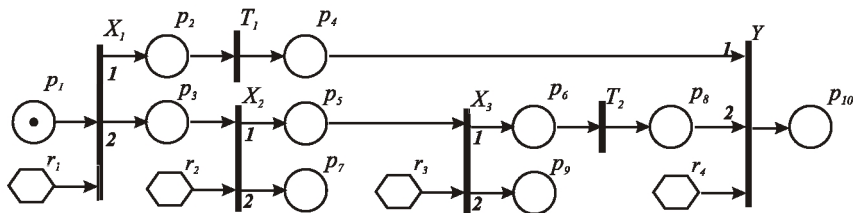


Рис. 2.8

В этой схеме наличие метки в позиции p_1 ассоциируется с началом моделирования работы системы. На переходе X_1 происходит розыгрыш технического состояния элемента A_1 . Метка передается в позицию p_2 , если элемент A_1 находится в работоспособном состоянии, и в позицию p_3 – в противном случае.

Переход T_1 ассоциируется с работой элемента A_1 системы. Если элемент A_1 находится в неработоспособном состоянии (наличие метки в позиции p_3), то происходит анализ работоспособного состояния элемента U (переход X_2). Если элемент U в работоспособном состоянии, то схема переключается на работу с элементом A_2 (метка в позиции p_5), а если нет, то метка поступает в позицию p_7 и дальнейшая работа процесса блокируется.

На переходе X_3 происходит анализ технического состояния элемента A_2 . Если этот элемент в работоспособном состоянии, то метка передается в позицию p_6 , если нет – в позицию p_9 .

Переход T_2 ассоциируется с работой элемента A_2 системы. Попадание метки в позицию p_{10} обозначает завершение процесса моделирования работы схемы.

В общем случае при моделировании накапливающихся отказов можно использовать подход, предложенный Н.Н.Бусленко [3] и позволяющий моделировать динамику смены состояний.

Макро- E -сетевая модель позволяет организовать моделирование процессов функционирования с учетом накапливающихся отказов элементов в виде итерационного процесса вычислений. Состояние системы $z(t_{i+1})$ в некоторый момент времени t_{i+1} после наступления $(i+1)$ -го отказа определяется ее текущим $z(t_i)$ состоянием и вероятностью появления $(i+1)$ -го отказа. Можно считать, что процесс смены состояний в данном случае является процессом накопления повреждений технической системой, который определяется потоком отказов ее поврежденных элементов.

При использовании макро-*E*-сетевых моделей накопление информации может быть организовано с применением некоторого универсального типового сегмента сетевой модели, представленного на рис. 2.9, принцип работы которого заключается в следующем.

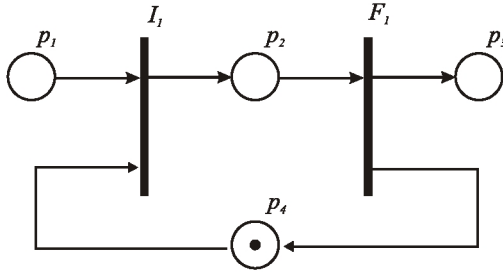


Рис. 2.9. Сегмент сетевой модели, обеспечивающий накопление информации

Здесь текущее состояние $z(t_i)$ БС описывается с помощью атрибута метки позиции p_4 . Позиция p_1 является входной для сегмента. Поступление в нее метки ассоциируется с новой информацией о вероятности отказа элемента. Переходы I_1 и F_1 образуют цикловой механизм изменения технического состояния БС.

При поступлении метки в позицию p_1 срабатывает переход I_1 . Во время фазы активности этого перехода происходит изменение исходного технического состояния БС с учетом информации о вероятности отказа элемента, которая поступила с приходом метки в позицию p_1 , и информации о текущем техническом состоянии БС, описываемом атрибутом метки в позиции p_4 .

После срабатывания перехода I_1 в позицию p_2 поступает метка, атрибуты которой будут содержать информацию об изменении

технического состояния БС, связанного с наступившим отказом одного из элементов БС.

При срабатывании перехода F_1 происходит восстановление активности позиции p_4 посредством помещения в нее метки, которая несет в себе информацию о новом текущем состоянии БС и одновременно снимает блокировку с перехода I_1 . Переход I_1 опять готов к срабатыванию при условии поступления в позицию p_1 новой метки, которая будет ассоциироваться с появлением нового отказа одного из элементов БС.

Рассмотренная последовательность срабатывания переходов I_1 и F_1 по изменению технического состояния БС продолжается до момента окончания поступления меток в позицию p_1 .

2.5. Задача использования разделяемого ресурса

Используемые в системе ресурсы можно отнести к одному из двух классов: неразделяемые и разделяемые. Неразделяемый ресурс в каждый момент времени может использоваться не более чем одним потребителем, в то время как разделяемый ресурс – несколькими потребителями. В качестве примера разделяемого ресурса КА можно привести энергоресурсы системы электропитания (СЭП). Разделяемый ресурс имеет, как правило, количественную характеристику (например, емкость аккумуляторных батарей).

Рассмотрим, как можно моделировать с помощью макро- E -сетей использование разделяемого ресурса.

Пусть в системе возможны три операции с ресурсом:

- потребление;
- восполнение;
- отказ от использования ресурса.

Таким образом, ресурс может не только использоваться потребителями, но и восполняться. Например, упомянутые выше энергоресурсы КА могут восполняться СЭП в случае разряда буфера аккумуляторных батарей. В этом случае для всех потребителей формируется жесткая временная задержка, соответствующая необходимому времени восполнения буферных батарей, например через солнечные батареи. Для общности задачи предусматривается и третья операция - отказ от использования ресурса. На рис. 2.10 представлена макро-*E*-сетевая модель использования разделяемого ресурса.

В состав сетевой модели входят переходы $X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, F_1, F_2, T_1$; позиции $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}$; макропозиция Q_1 и решающие позиции r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 .

Поступление команды на использование разделяемого ресурса ассоциируется с наличием метки в макропозиции Q_1 .

В модели в полной мере реализован механизм использования атрибутов меток для передачи количественных характеристик.

Метка в макропозиции Q_1 имеет 2 атрибута: $N_1^{Q_1}$ - размер затребованного или восполняемого ресурса; $N_2^{Q_1}$ - признак, характеризующий вид операции над ресурсом ($N_2^{Q_1}=1$ – отказ от использования ресурса; $N_2^{Q_1}=2$ – потребление ресурса; $N_2^{Q_1}=3$ – восполнение ресурса). Наличие варианта $N_2^{Q_1}=1$ необходимо, например, для случая, когда во время процесса функционирования возможен отказ БС и она перестает потреблять энергоресурсы.

На переходе X_1 происходит разветвление процесса: дуга 1 – характеризует вариант отказа от использования ресурса; дуга 2 – потребление ресурса; дуга 3 – восполнение ресурса.

Отказ от использования ресурса. Через позицию p_1 и переход Y_3 метка переходит в позицию p_{12} , в которой она имеет те же атрибуты, что и на входе – в макропозиции Q_1 .

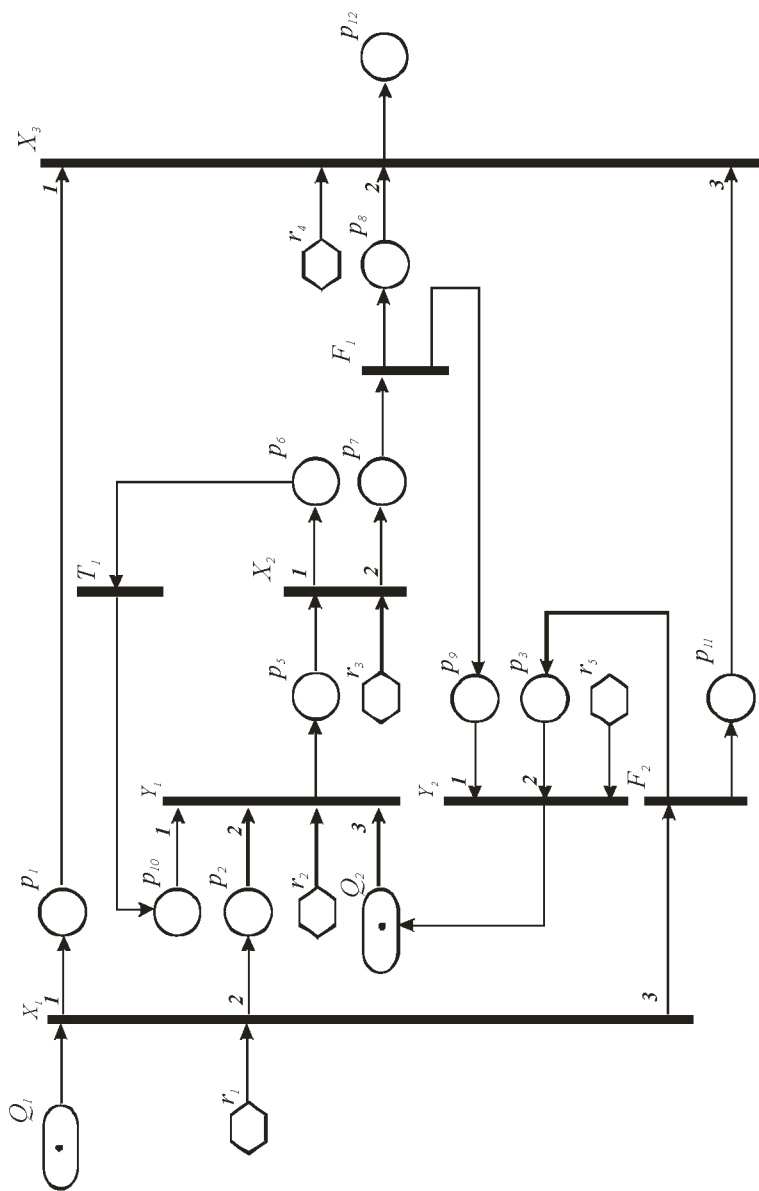


Рис. 2.10. Макро-Е-сетевая схема модели использования разделяемого ресурса

Потребление ресурса. На переходе Y_1 проверяется наличие ресурса, ассоциируемого с наличием метки в позиции p_3 (обязательное условие), и запрос на использование ресурса (метка в позиции p_2 – первоначальное обращение к ресурсу, метка в позиции p_{10} – повторное обращение к ресурсу после временной задержки, связанной с отсутствием требуемого количества ресурса). После срабатывания перехода Y_1 метка в позиции p_5 имеет атрибуты, характеризующие запрошенный ресурс.

На переходе X_2 проверяется условие возможности выделения требуемого количества ресурса. Если такой возможности нет, то на переходе T_1 формируется временная задержка, после которой метка поступает в позицию p_{10} для повторного обращения к ресурсу.

Значения атрибутов метки в позиции p_{10} совпадают со значениями атрибутов метки в позиции p_2 . Если запрос на используемый ресурс удовлетворяется, то метка через позиции p_7 , p_8 и переходы F_1 , X_3 поступает в позиции p_{12} и p_9 . Срабатывание перехода Y_2 позволяет изменить количественную характеристику ресурса. В данном случае он будет уменьшен на $N_1^{Q_1}$ величину.

Восполнение ресурса. В операции восполнения ресурса участвуют переходы Y_2 и F_2 . При срабатывании перехода Y_2 приоритетом обладает режим восполнения ресурса (метка в позиции p_3). После срабатывания перехода Y_2 изменяется количественная характеристика ресурса. В данном случае он будет увеличен на величину $N_1^{Q_1}$.

2.6. Задача выбора наихудшего исхода при статистическом моделировании

При анализе состояния технической системы, как правило, возможны несколько исходов моделирования, например, работоспособное состояние, состояние с частичной потерей

работоспособности и полностью неработоспособное состояние системы. Поскольку в общем случае на исходы моделирования состояния системы будут влиять состояния всех ее элементов, то при моделировании возможны варианты, когда при одних и тех же исходных данных может одновременно отказать несколько элементов.

В общем случае для некоторой совокупности элементов отказы могут быть независимыми событиями. С учетом этого возможны ситуации, при которых, например, отказ одной совокупности элементов ведет к отказу системы, а отказ второй совокупности элементов - к состоянию системы с частичной потерей работоспособности.

Поскольку на практике итоговое состояние системы определяется как наилучшее из возможных исходов, то при моделировании необходимо в сетевых моделях исключать ситуацию возможного "двойного состояния" (или выбрать наилучший исход).

Пусть в задаче дополнительно требуется накапливать статистическую информацию по результатам исходов.

Макро-*E*-сетевая модель выбора наилучшего исхода при статистическом моделировании представлена на рис. 2.11.

В этой модели на базе переходов Y_1 и X_{50} организованы циклические вычисления. Решающая позиция r_1 перехода Y_1 при первой итерации обеспечивает срабатывание перехода при наличии метки в позиции p_1 (признак начала моделирования), при последующих реализациях - в позиции p_{500} . На переходе X_{50} происходит проверка окончания статистических вычислений. При выполнении условия их окончания с помощью решающей позиции r_{50} метка передается в позицию p_{510} , в противном случае - в позицию p_{500} .

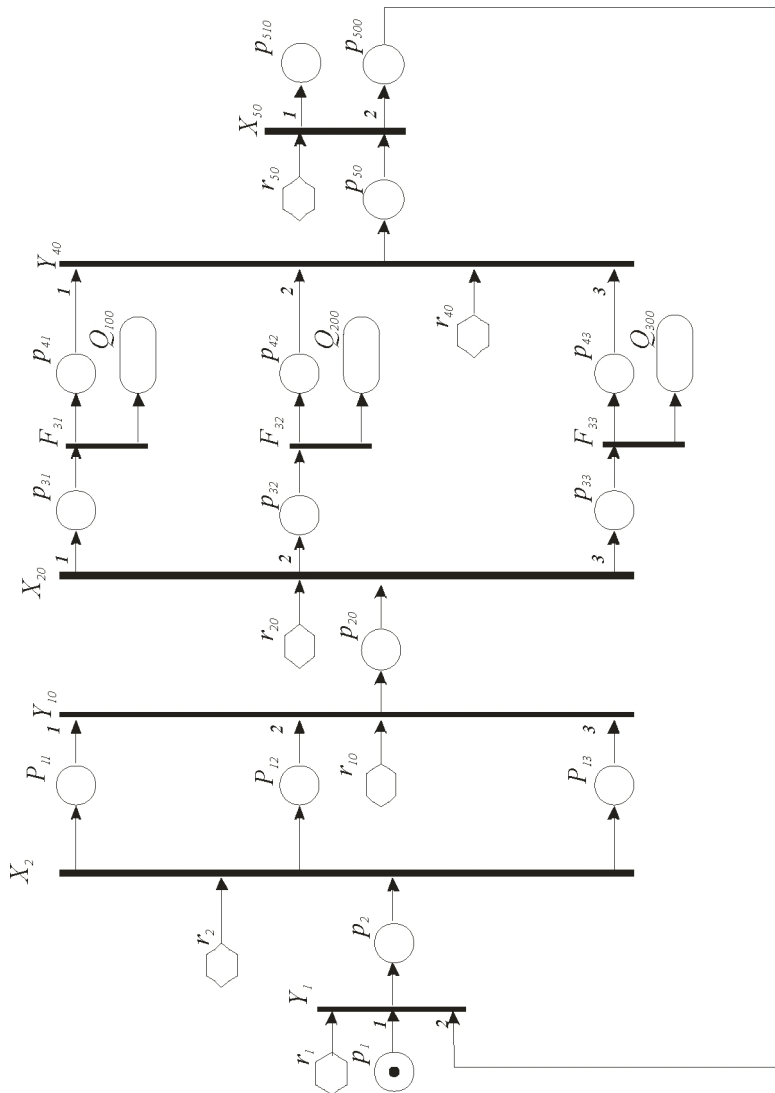


Рис. 2.11. Сетевая модель выбора наилучшего исхода при статистическом моделировании

Переход X_2 моделирует процесс анализа состояния бортовой системы, при котором метка поступает в позиции p_{11} , p_{12} или p_{13} в зависимости исходных данных решаемой задачи.

Переходы Y_{10} и X_{20} обеспечивают выбор наилучшего исхода. После срабатывания перехода X_{20} метка поступает в позицию p_{31} , если худшим исходом является первое состояние (метка в позиции p_{11}); в позицию p_{32} , если худшим исходом является второе состояние (метка в позиции p_{12}); в позицию p_{33} , если худшим исходом является третье состояние (метка в позиции p_{11}).

Переходы F_{31} , F_{32} , F_{33} обеспечивают накопление статистической информации в позициях-очередях Q_{100} , Q_{200} , Q_{300} . Одновременно эти переходы обеспечивают появление меток в позициях p_{41} , p_{42} , p_{43} для организации типового цикла статистического моделирования.

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите основные подходы к построению математических процессов функционирования сложных технических систем.

2. Каким множеством элементов может быть описан конечный автомат?

3. Какие особенности кусочно-линейных агрегатов?

4. Почему применение стохастических сетей ограничено при исследовании процессов функционирования КА?

5. Для описания каких систем, в первую очередь, были предложены сети Петри?

6. Дайте формальное описание сети Петри.

7. Какая сеть Петри называется простой?

8. Чем принципиально отличаются макрочисловые сети от сетей Петри?

9. Множествами каких элементов формально определяется макро-Е-сети?

10. Какую роль играют метки в макро-Е-сетях?

11. Опишите условие срабатывания перехода перераспределения макро-Е-сети.

12. В чем особенность условия срабатывания макроперехода выбора макро-Е-сети?

13. Каким образом можно смоделировать циклограмму работы БС?

14. Какие особенности целесообразно учитывать при моделировании отказов элементов БС?

15. Каким образом можно учесть восстановление свойств поврежденных элементов при моделировании отказов элементов БС?

16. Какие варианты резервирования БС можно описать сетевыми моделями?

17. В чем состоит особенность задачи учета временной последовательности отказов элементов?

18. Опишите сетевую модель, позволяющую организовать моделирование процессов функционирования с учетом накапливающихся отказов элементов в виде итерационного процесса вычислений.

19. Какие ресурсы называются разделяемыми?

20. Для какой цели может использоваться задача выбора наихудшего исхода при статистическом моделировании?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Безопасность космических полетов. -М.: Машиностроение, 1977, 264с.
2. Брауэр, В. Введение в теорию конечных автоматов / В.Брауэр; пер. с нем.; под ред. Ю.И.Журавлева. - М.: Радио и связь, 1987. - 392 с.
3. Бусленко, В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем /В.Н.Бусленко; под ред. Н.П.Бусленко. - М.: Наука, 1977. -239с.
4. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем /Н.П.Бусленко. - М.: Наука, 1978. -399 с.
5. Бусленко, Н.П. Лекции по теории сложных систем/Н.П. Бусленко, В.В. Калашников, И.Н. Коваленко. - М.: Сов. радио, 1973. - 439 с.
6. Васильев, В.В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем /В.В. Васильев, В.В. Кузьмук. -Киев: Наук. Думка, 1990. -218с.
7. Моделирование сложных систем с использованием сетей массового обслуживания /К.П. Дурандин [и др.]. -Л.: ЛПИ, 1981. - 85с.
8. Еленев, В.Д. Моделирование процессов функционирования космических аппаратов с учетом накапливающихся отказов элементов бортовых систем /В.Д. Еленев. //Вестн. СГАУ, №1. - Самара, 2004.
9. Еленев, В.Д. Оценка технического состояния бортовых систем с учетом накапливающихся отказов их элементов при длительных сроках активного существования космических аппаратов /В.Д. Еленев. //Вестн. СГАУ, № 1(9). -Самара, 2006.
- 10.Киндлер, Е. Языки моделирования / Е.Киндлер. -М.: Энергоатомиздат, 1985. -288 с.

11. Костин, А.Е. Принципы моделирования сложных дискретных систем /А.Е.Костин. - М.: МИЭТ, 1983. - 106 с.
12. Лескин, А.А. Сети Петри в моделировании и управлении / А.А.Лескин, А.М. Мальцев, А.М.Спиридонов.- Л.: Наука, 1989, - 133с
13. Минский, М. Вычисления и автоматы /М.Минский; пер. с англ. -М.: Мир, 1971. -364с.
14. Надежность технических систем: Справочник /под ред. И.А.Ушакова. -М.: Радио и связь, 1985.
15. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем /Дж.Питерсон; пер. с англ.; под ред. В.А.Горбатова. - М.: Мир, 1984.
16. Райншке, К. Оценка надежности систем с использованием графов/К.Райншке, И.А. Ушаков; под ред. И.А. Ушакова. -М.: Радио и связь. 1988. -208 с.
17. Саати, Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения /Т.Л.Саати. -М., 1971.
18. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов по спец. "Автоматизированные системы управления" /Б.Я.Советов, С.А.Яковлев. -М.: Высш. шк., 2001. -343с.
19. Bunday, V.D. Basic Queuing Theory /V.D.Bunday - London: Arnold, 1986.- 134p.
20. Petri, C.A. Fundamentals of theory of asynchronous information flow /C.A Petri //Proc. IFIP Congress 62, pp. 386-390, 1963.
21. Petri, C.A. Kommunikation mit Automaten /C.A Petri -Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des ИМ Nr.3, 1962, Also, English translation, "Communication with Automata." New York: Griffise Air Force Base. Tech. Rep. RADC-TR-65-377. Vol. 1, suppl. 1, 1966.
22. Yelenev, V.D. Design Technique Of Spacecraft Failure Safety Simulation /V.D.Yelenev, N.A.Shostak //Proc. Of International Conference on Electronics and Computers HICEC'92, -Harbin, 1992.

Учебное издание

Еленев Валерий Дмитриевич
Салмин Вадим Викторович

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ
АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Учебное пособие

Редакторская обработка *Т.К. Крестина*
Корректорская обработка *А.В. Ярославцева*
Доверстка *В.С. Телешева*

Подписано в печать 14.11.2006. Формат 60x84x1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 3,2. Усл. кр.-отг. 3,4. Печ. л. 3,5.

Тираж 50 экз. Заказ . ИП-29/2006.

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34

Издательство Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34

