

УДК 681.513

Ластовченко М. М., канд. техн. наук  
Марущак В. И.

## ПРОГРАММНАЯ СРЕДА ИТЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Институт компьютерных технологий Национального авиационного университета

*Рассматривается программная среда итеративного моделирования надежности функционирования многоканальных линий связи. Показано, что совместное применение аналитических и имитационных моделей существенно повышает точность анализа при приемлемом времени моделирования.*

### Введение

Бурное развитие информационно-коммуникационной технологии с использованием развитых моделей количественного анализа процессов функционирования телекоммуникационных сетей (ТКС) на всех этапах их проектирования [1-3] обеспечивает разработку наиболее перспективных для них аппаратно-программных средств (АПС). Моделирование существенно сокращает объем экспериментальных исследований. Кроме того, используя моделирование можно создавать высокоэффективные системы консалтинга, для отбора тех АПС, которые обладают лучшими характеристиками [4].

На сегодняшний день самым перспективным следует считать итеративное моделирование, важнейшим достоинством которого является его универсальность [5]. Для каждого нового проекта, оно позволяет относительно просто изменять взаимодействие моделей (аналитических и имитационных) под заданные начальные условия и режимы функционирования исследуемых ТКС, добиваясь требуемой точности количественного анализа при приемлемых затратах времени и средств.

*Аналитические модели* реализуются в виде такой системы уравнений искомых величин, которая допускает получение нужного результата или в явном виде или численным методом [6]. Аналитическое решение дает более полную начальную

картину, кроме того, с точки зрения последующей оптимизации параметров АПС оно практически незаменимо. Однако, аналитическому моделированию присущи определенные ограничения, которые становятся особенно существенными на заключительных этапах создания АПС, когда речь идет об оценке характеристик некоторого сравнительно небольшого числа вариантов окончательного их построения. На этих этапах требуется учитывать более полное описание процессов функционирования и следует переходить к использованию имитационных моделей.

*Имитационные модели* позволяют детально воспроизвести весь процесс функционирования как составляющих АПС, так и ТКС в целом. Принципиальной особенностью имитационного моделирования является тот факт, что для получения точных результатов используются статистические методы, которые требуют значительных затрат средств и времени [7].

В последние годы в США, Японии, странах ЕС ведутся активные исследования по созданию инструментально-технологических комплексов моделирования (ИТКМ) [8]. Однако анализ имеющихся ИТКМ позволяет сделать вывод, что существующие системы моделей не достаточно увязаны с воспроизведением процессов функционирования как в рамках эталонной модели (ЭМ) взаимодействия открытых систем (ВОС), так и в использовании специальных языков описа-

ния и спецификаций процессов (например, *SDL-2000* [9]).

В настоящее время для разработки программной среды итеративного моделирования можно использовать ряд готовых автономных программных или аппаратно-программных средств [10]. Современные компиляторы и средства визуального программирования в процессе разработки программной среды, обеспечивают создание пользовательских интерфейсов делающих процесс работы системотехника легким в освоении [11].

В предлагаемой работе рассматривается как методология создания программной среды итеративного моделирования, так и требования предъявляемые к точности анализа. На примере количественного анализа надёжности функционирования АПС узла коммутации пакетов (УКП) иллюстрируется реализация одного из вариантов программной среды.

#### **Формализация процессов функционирования узла коммутации**

В настоящее время, можно выделить ряд АПС, которые, хотя и интегрируют разнородные типы информации в мультимедийный трафик (ММТ), но не позволяют получать приемлемое качество передачи при недостаточной надежности каналов. Это перспективные АПС фирм *Nortel (Magellan Passport!60)*, *IBM (2220Nways Broad Band Switch Model 500)* и *GDC (APEXMAC)* [3].

Все рассматриваемые АПС имеют одну и ту же функциональную структуру: управляющий процессор (конфигурирование и восстановление надежности резервированием), память с разделяемыми буферами к кроссточечным коммутаторам (КК) (процессорами ввода/вывода) в общей среде распределенной обработки. Общий недостаток – отсутствие механизмов формирования ММТ, а также системы адаптивного управления распределением памяти и трафика при потере надежности. Хотя фирма *Nortel* и ввела средства поддержки коммутируемых вир-

туальных соединений (*SVC*) для технологий *ATM* и *Frame Relay* в виде механизма раннего сброса пакетов, исключаящего перегрузки, и инверсионное мультиплексирование трафика *ATM* по каналам *E1/T1* с 12 уровнями приоритета для ММТ-трафика *VBR*, эти средства пока еще не обеспечивают бесперебойной работы как УКП, так и сети в целом. Но наиболее существенным недостатком является отсутствие механизма адаптивного поддержания надежности функционирования [12].

Проблема анализа процессов передачи ММТ (режимы видеоконференцсвязи [13]) затрагивает относительно сложные математические модели приоритетного (абсолютные и относительные приоритеты) обслуживания разнородных (по интенсивности поступления и обслуживания) потоков пакетов многоканальными системами с администрированными под каждый канал оптимальными объемами памяти. Создание таких моделей требует предварительного исследования [13]:

- особенностей взаимовлияния процессов коммутации и буферизации;
- анализа надежности функционирования АПС.

Примером для анализа вышеизложенных процессов может быть разработка высокоскоростного коммутатора пакетов, в котором использован подход, основанный на идее распределенной памяти – коммутатор японской фирмы *Hitachi* (рис. 1).

Как показано на рис. 1, помимо входных/выходных больших интегральных схем (БИС), осуществляющих преобразование последовательного формата в параллельный и наоборот, а также БИС преобразования заголовка (ПЗ), которые обрабатывают номер виртуального канала в каждом заголовке, в коммутаторе используются три типа БИС:

- коммутационная БИС (БИС КМ);
- БИС, выполняющая контрольные функции (БИС КОНТР);
- БИС буферов адресов используемых областей памяти (БИС БА ИОП).

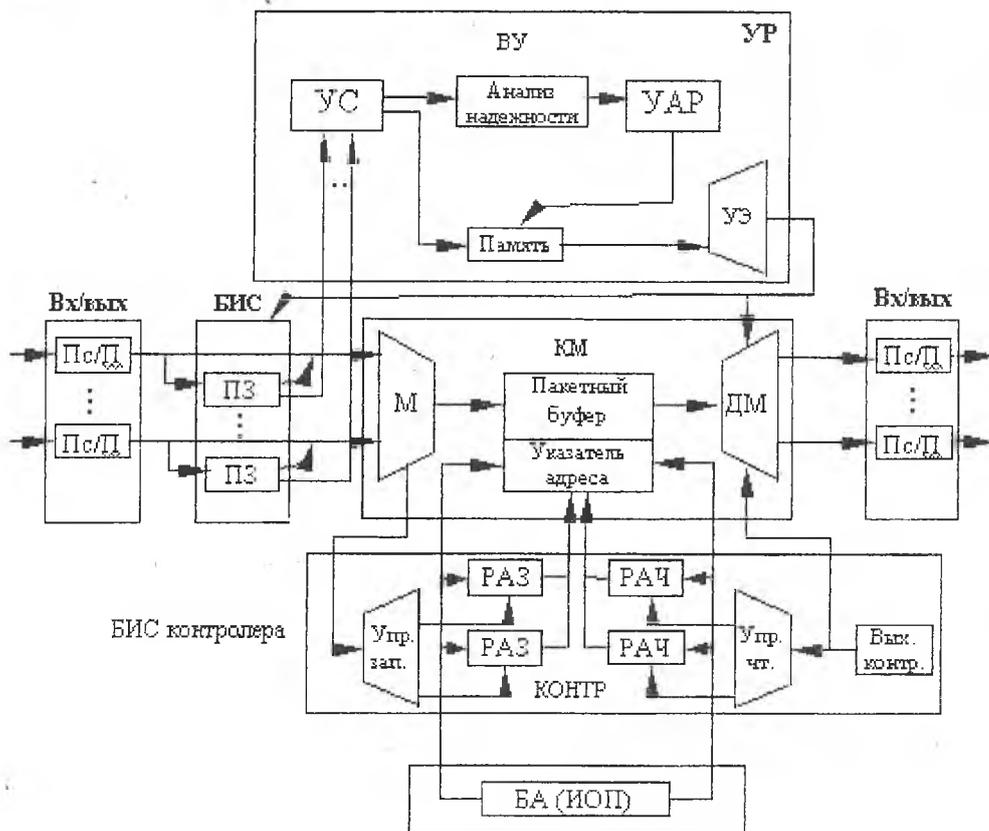


Рис. 1. Структурная схема УКП фирмы *Hitachi* с адаптивными реконфигуратором и маршрутизатором

Микросхемы КМ (БИС КМ) содержат память, мультиплексор (М), демультиплексор (ДМ).

Микросхемы КОНТР содержат  $n$  регистров адресов записи (РАЗ) и  $n$  регистров адресов чтения (РАЧ), по одной паре на каждый связанный список.

При каждом поступлении пакета на вход коммутатора после преобразования заголовка (при котором определяется, в какой связанный список следует поместить пакет) опрашивается соответствующий регистр адресов записи для получения адреса свободной области памяти, в которую следует записать данный пакет. Одновременно идентифицируется база адресов (используемых адресов записи) и соответствующие указатели изменяют свое значение. Подобным же образом для каждого временного интервала в каждом связанном списке с помощью регистра адресов чтения идентифицируется пакет, который извлекается из памяти и передается к выходному каналу. При этом одно-

временно корректируются указатели и содержимое буферов адресов используемых областей памяти. Чтобы обеспечить высокое быстродействие, используется разрядная организация памяти с большим числом идентичных микросхем коммутатора, соединенных параллельно.

Реализация механизма реконфигурации в схеме коммутатора осуществлена функциональной надстройкой устройства реконфигурации (УР) (рис. 1). Принцип работы этого устройства состоит в следующем: после поступления пакета на вход коммутатора (блоки БИС ПЗ) определяется количество основных каналов и их характеристики. Эти данные поступают в устройство реконфигурации, где после прохождения устройства соединения (УС) переходят в вычислительное устройство (ВУ). В нем происходит вычисление надежности исходящих линий связи (ЛС). Полученные значения поступают в устройство анализа результатов (УАР), где сравниваются с допустимыми значения-

ми. В зависимости от результатов сравнения управляющий элемент (УЭ) формирует определенный сигнал для реконфигурации ЛС. Если надежность основных каналов ЛС малая, то управляющий эле-

мент добавляет необходимое количество резервных каналов.

Формализованная модель УКП представлена на рис. 2.

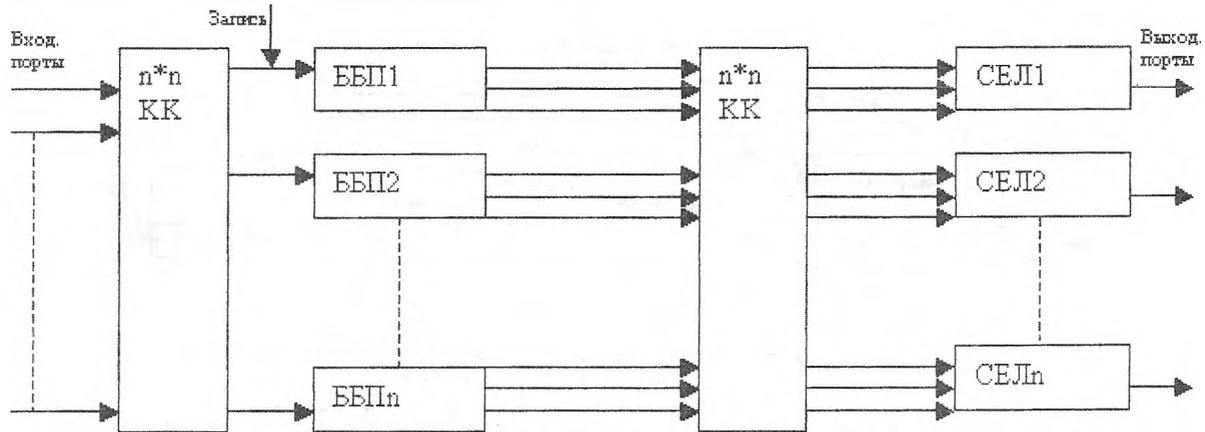


Рис. 2. Функциональная схема УКП с разделенным мультиплексором

В зависимости от задач, которые реализуют АПС УКП, они могут характеризоваться различными допустимыми временами запаздывания ММТ, что позволяет в отдельных случаях восстанавливать составляющие их каналы без прекращения процессов передачи. Для указанного класса систем одновременный ввод аппаратной и временной избыточностей, обеспечивает заданную надежность функционирования [12, 14].

Для решения этой задачи необходимо осуществить формирование структуры ЛС, обеспечивающей конвейерный принцип использования каналов для пиковых режимов функционирования при условии, что их надежность не идеальна.

На рис. 3 приведена временная диаграмма процесса функционирования.

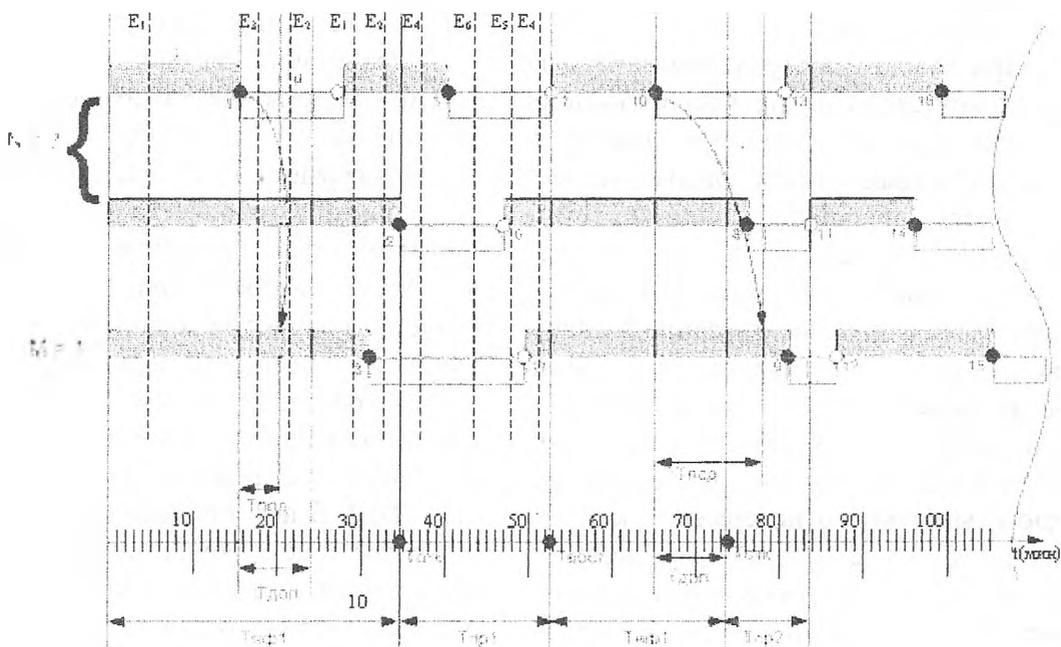


Рис. 3. Временная диаграмма процесса функционирования линии связи

Процесс формализации можно рассмотреть на следующем примере. Пусть АПС УКП состоит из двух основных (рабочих) каналов и одного резервного. При функционировании ЛС каждый из каналов в процессе работы может отказать. Переход на резервный канал, при отказе основного, без срыва функционирования (отказа системы) возможен, если время перехода – случайная величина  $\tau_{пер}$  меньше или равна  $T_{доп}$  ( $T_{доп}$  – допустимое время перехода на резерв). При этом восстанавливается любой отказавший канал. В такой постановке срыв функционирования ЛС наступает в следующих случаях:

1. Отсутствует резервный канал в случае отказа основного (так как время

восстановления  $\tau_{в}$ , как правило, намного превышает допустимое время  $T_{доп}$ ).

2. Время перехода на резервный канал больше допустимого:  $\tau_{пер} > T_{доп}$ .

**Аналитические модели итеративного моделирования**

На рис. 4 приведена архитектура программной среды итеративного моделирования. Верхний уровень (обобщенный анализ) воспроизводит начальные оценки надежности функционирования с учетом введения ограничений: предполагается мгновенный переход на резервные каналы. Средний уровень (более детальное воспроизведение): вводится допустимое время перехода на резервный канал.

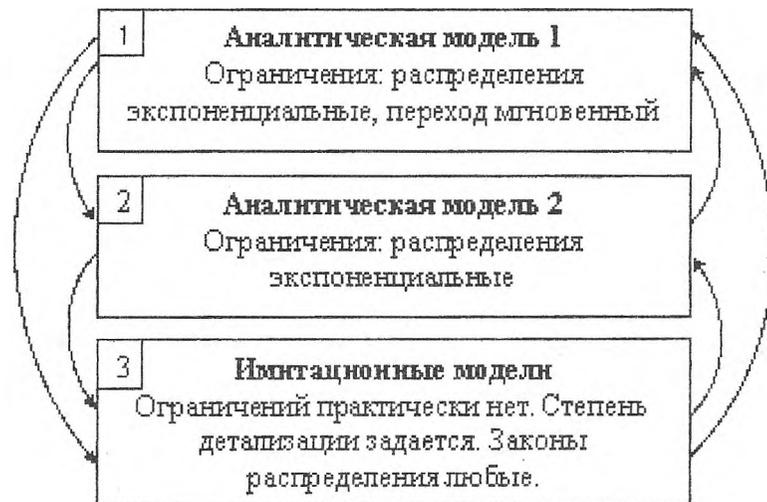


Рис. 4. Архитектура программной среды итеративного моделирования итеративного взаимодействия моделей

Для первичного анализа надежности функционирования: аналитические модели 1 и 2 (рис. 4). Уже существует целый ряд математических формул [15] на которых базируются эти модели.

Нижний уровень – имитационные модели, решают задачи количественного анализа с любой степенью детализации процессов функционирования.

Пусть в ЛС  $n$  каналов, резервных –  $M$ , и  $N$  основных ( $N=n-M$ ). Среднее время нормального функционирования системы  $T_{cp}$  будет оцениваться следующей формулой [15]:

$$T_{cp} = \frac{1}{(N + M)\lambda} \sum_{s=0}^{\mu} \frac{\sum_{i=0}^s \frac{(N + M)}{i!(N + M - i)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i}{s!(N + M - 1 - s)! \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s}, \quad (1)$$

где  $\lambda, \mu$  – интенсивности отказов и восстановлений.

Для более точного количественного анализа (модель 2, рис.4) необходимо использовать аппарат полумарковских процессов [16]. Для данного примера (рис.3) требуется применить преобразование исходной системы  $\Sigma$ , когда состояния процесса объединяются в группы. Общая методика построения такого объединения и основные формулы приведены в работах [12, 17, 18].

Множество состояний  $E$  системы  $\Sigma$  определяется следующим образом  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_6\}$ , где:

$E_1 = (1,1,1)$  – все каналы исправны:

$E_2 = (1,1,0)$  – основные каналы исправны, резервный неисправен;

$E_3 = \begin{pmatrix} 1,0,1 \\ 0,1,1 \end{pmatrix}$  – один из основных неисправен, резервный исправен;

$E_4 = \begin{pmatrix} 0,1,0 \\ 1,0,0 \end{pmatrix}$  – один из основных неисправен, резервный неисправен;

$E_5 = (0,0,1)$  – основные неисправны, резервный исправен;

$E_6 = (0,0,0)$  – все каналы неисправны.

В этом случае матрица переходных вероятностей системы имеет следующий вид:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & P_{12} & P_{13} & 0 & 0 & 0 \\ P_{21} & 0 & 0 & P_{24} & 0 & 0 \\ 0 & P_{32} & 0 & P_{34} & P_{35} & 0 \\ 0 & 0 & P_{43} & 0 & 0 & P_{46} \\ 0 & 0 & 0 & P_{54} & 0 & P_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$P_{ij} \geq 0; P_{ii} = 0; \sum_{j=1}^{j=6} P_{ij} = 1$$

Граф переходов системы, описывающий процесс ее функционирования (рис. 3), представлен на рис. 5.

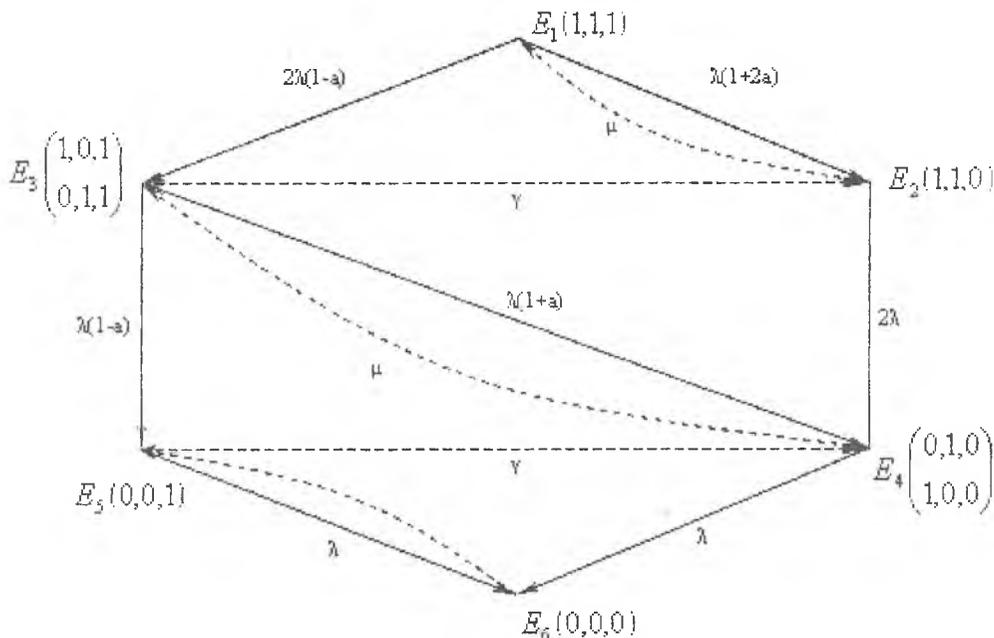


Рис. 5. Граф переходов, описывающий процесс функционирования системы ( $N=2, M=1$ )

Для рассматриваемого примера естественным является следующее укрепление (объединение) состояний:  $F_1 = E_1 \cup E_2$ ,  $F_2 = E_3 \cup E_4 \cup E_5 \cup E_6$ .

Для системы  $\Sigma^*$ , полученной в результате объединения состояний исходной системы  $\Sigma$ ,  $F_1$  является состоянием нормального функционирования. Если

система  $\Sigma$  находится в одном из состояний  $E_3, E_4, E_5, E_6$ , то это означает, что система  $\Sigma^*$  находится в неисправном состоянии  $F_2$ , т. е. после срыва нормального функционирования.

Не останавливаясь на подробном выводе, приведем формулу для оценки среднего время функционирования [17]:

$$T_{cp} = \frac{1}{A^2} \left\{ \left[ \frac{2}{9\lambda} e^{-\gamma T_{дон}} + \frac{2(1+2a)(5\lambda + \mu)}{9(2\lambda + \mu)^2} A \right] + \frac{2}{3} e^{-\gamma T_{дон}} + \frac{(1+2a)2\lambda}{3(2\lambda + \mu)} \right\} \frac{(5\lambda + \mu)}{3\lambda(2\lambda + \mu)} (1-A) \quad (3)$$

$$\text{где } A = 1 - \frac{1+2a}{3(2\lambda + \mu)}, \quad a = 1 - e^{-\gamma T_{дон}}$$

**Имитационное моделирование как средство повышения точности количественного анализа**

Требованиями, которым должен удовлетворять алгоритм имитационного моделирования, являются [7, 18]:

1. Необходимая степень адекватности реальным процессам функционирования формализованной модели (адекватность временных диаграмм рис. 3), которые должны учитывать как внутренние, так и внешние воздействия на процессы функционирования с учетом их взаимодействие на любом уровне декомпозиции.

2. Оптимальное планирование процессов моделирования по времени, с целью воспроизведения критических ситуаций с минимальными затратами машинного времени.

3. Визуализацию процессов моделирования (временная диаграмма и граф процесса, результаты приведенные в виде графиков).

На рис. 6 представлена укрупненная схема алгоритма имитационного моделирования реализуемого методом критических ситуаций [7].

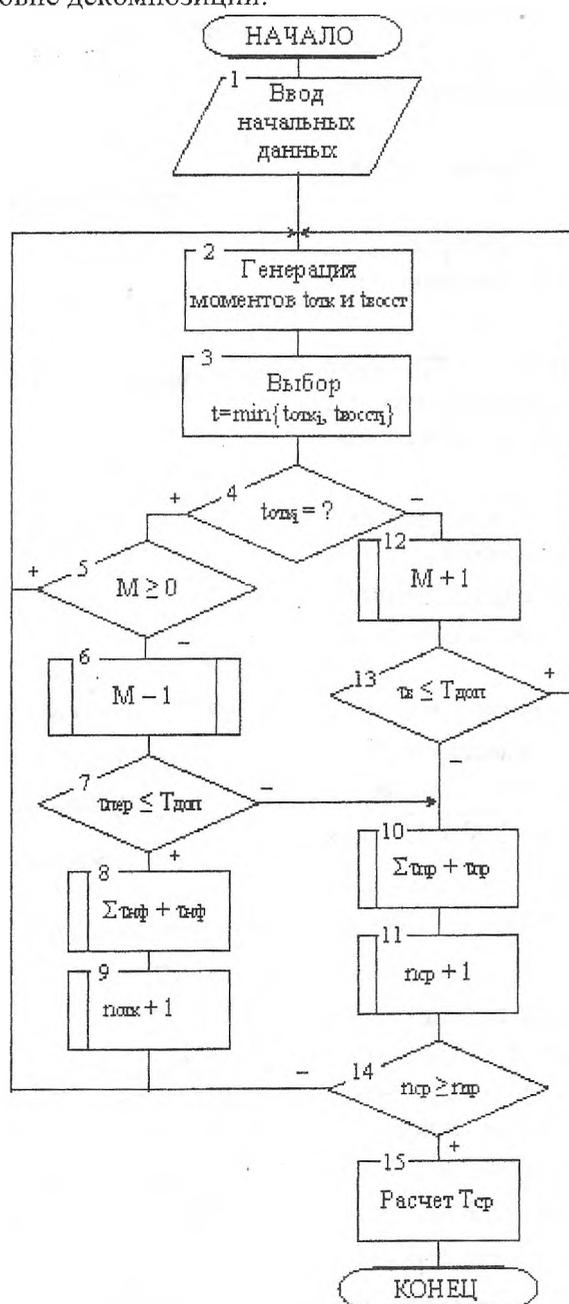


Рис. 6. Укрупненный алгоритм имитационного моделирования

В блоке 1 осуществляется ввод исходных данных: количество основных  $N$  и  $M$  резервных каналов,  $\lambda[i]$ ,  $\mu[i]$ ,  $\chi[i]$  – интенсивности отказов, восстановления, переходов  $i$ -го канала.  $T_{дон}$  – допустимый перерыв и коэффициент доверия  $\gamma$  [19], т.н. заданная точность (заданные объемы статических выборок).

Блок 2 реализует генерацию моментов отказов и восстановления каналов.

В блоках 3 и 4 осуществляется выбор ближайшего момента (блок 3) и определяется его тип (блок 4).

В блоках 5-10 анализируется последствия отказа (выявляются критические моменты срыва функционирования: моменты 2, 8 рис. 3).

Блоки 12-13 воспроизводят процесс восстановления.

Блоки 8-11 счетчики, которые подсчитывают число отказов, срывов, восстановлений.

В блоке 14 осуществляется проверка достаточности объема статистической выборки, обеспечивающей заданную точность моделирования.

В блоке 15 производится расчет значений оцениваемых характеристик.

В процессе статистических испытаний следует выделить три основополагающих положения [7, 18].

1. Текущая конвейерная генерация потоков отказов и восстановлений формируется на базе первичной генерации отказов всех каналов  $\tau_i, i = \overline{1, N+M}$ , которая поддерживается (как показано на рис. 6) до момента окончания моделирования:  $t \mid_{n_{cp} \geq n_{cp, mp}}$  (блок 14).

2. Анализ критических ситуаций последствий отказов: блоки 5-6-7-8-9 (нет срыва функционирования) и блоки 5-6-7-10-11 (есть срыв функционирования).

3. Окончание моделирования, которое фиксируется условием  $n_{cp} \geq n_{mp}$ . Статистические зависимости для построения доверительных интервалов  $T_{cp}$  (при экс-

поненциальном распределении параметров  $r_{oi}$ ) определяется отношением  $q$  [19]:

$$q = \frac{2n_{cp_i} \cdot T_{cp_i}^*}{T_{cp_i}}, \quad (4)$$

где  $n_{cp_i}$  – число отказов  $i$ -го канала, приводимых к срыву функционирования;

$T_{cp_i}^*$ ,  $T_{cp_i}$  – оценки средней наработки на срыв и средняя (практически истинная) наработка.

$T_{cp_i}^*$  имеет  $\chi^2$  распределение с  $2n_{cp_i}$  степенями свободы при условии, что моделирование, по результатам которого оценивается  $T_{cp_i}^*$ , прекращается после  $n_{cp_i}$ -го срыва.

Если параметр  $\lambda_i = \frac{1}{T_{cp_i}}$  истинное значение, то  $\lambda_i^* = \frac{1}{T_{cp_i}^*}$  его оценка по результатам моделирования:

$$T_{cp_i}^* = \frac{\sum_{i=1}^{n_{cp}} \tau_{cp_i}}{n_{cp_i}}, \quad (5)$$

где  $\sum_{i=1}^{n_{cp}} \tau_{cp_i}$  – суммарная наработка на срыв от отказов всех каналов, у которых  $\tau_{нф_i} > T_{дон}$  (а также  $\tau_{oi} > T_{дон}$ ).

Следовательно, с вероятностью  $(1-\varepsilon)$  можно утверждать, что значение соотношения (3) лежит в интервале  $\frac{\varepsilon}{2}$  и  $(1-\frac{\varepsilon}{2})$  процентными значениями  $\chi^2$  распределения [19]:

$$P \left\{ \frac{2n_{cp_i} T_{cp_i}^*}{\chi_{\frac{\varepsilon}{2}}^2(2n_{cp_i})} \leq T_{cp_i} \leq \frac{2n_{cp_i} T_{cp_i}^*}{\chi_{1-\frac{\varepsilon}{2}}^2(2n_{cp_i})} \right\} = 1 - \varepsilon. \quad (6)$$

Таким образом, задавая требуемый коэффициент "доверия"  $K_d = 1-\varepsilon$ , можно определить требуемый объем статистической выборки  $n_{cp_i}^{mp}$ , при достижении кото-

$T_1$

Материалы МНПК "Розвиток сучасних послуг зв'язку через інтелектуальні платформи". – 2002. – С.179-182.

5. Ластовченко М. М., Губенко А. Е. Использование системы итеративного моделирования для многокритериального анализа алгоритмов реконфигурации радиосетей // – М.: ВНИИМОИ "Автоматизированные системы разработки АПС вычислительных сетей". – 1990. – С.56-60.

6. Ластовченко М. М. Автоматизированные комплексы моделирования и расчета сетей связи // – К.: Знание. – 1981. – 36 с.

7. Ластовченко М. М., Мазниченко С. В. Анализ надежности функционирования многоканальных систем методом статистического моделирования // – К.: Знание КВИРТУ "Методы расчета эксплуатационной надежности сложных систем". – 1968. – С.73-102.

8. Стренс Т. Учимся моделировать // – М.: Сети. – №5. – 1998. – С.130-135.

9. SDL-2000 // [www.sdl-forum.org](http://www.sdl-forum.org)

10. Ластовченко М. М., Биляк В. И. Проблемы создания инструментально-технологических систем проектирования АПС интеллектуальных сетей // – К.: Проблемы программирования. – 2004. – №2/3 – С. 497-504.

11. *Технология системного моделирования*. Под. ред. Емельянова С.В. // – М.: Машиностроение. – 1988. – 520 с.

12. Ластовченко М. М., Витвицкий А. Н. Многокритериальный анализ в адаптивном управлении надежностью передачи мультимедийного трафика // – К.: Проблемы информации и управления. – 2005. – №1. – С.81-92.

13. Ластовченко М. М., Ярошенко В. Н., Биляк В. И. Математические аспекты проектирования интеллектуальных коммутационных систем передачи мультимедийных трафиков. // – К.: Математи-

чні машини і системи. – 2003. – №4/5. – С. 66-75.

14. Ластовченко М. М., Креденцер Б. П., Сидоров Л. А. Оценка надежности радиоэлектронных систем при конечном времени подключения резерва // – К.: КВИРТУ. Надежность и эксплуатация РЭА. – т.№2. – 1965. – С. 23-27

15. *Надежность технических систем*. Справочник. Под ред. И. А.Ушакова // – М.: Радио и связь. – 1985. – 608 с.

16. Королюк В. С., Турбин А. Ф. Полумарковские процессы и их приложения // – К.: Наукова думка. – 1976. – 310 с.

17. Ластовченко М. М., Лесневский Ю. Г., Синявский Л. М. Разработка модели анализа надежности функционирования интегрируемых систем передачи и обработки. // – М.: Техника средств связи. – 1978. – С.70-82.

18. Ластовченко М. М., Губенко А. Е., Черноусова В. А. Интегральная система разработки АПС информационных вычислительных сетей // – К.: Знание. – 1990. – 24 с.

19. Вовк Л. И., Ластовченко М. М. Построение доверительных интервалов для характеристик надежности систем методом статистического моделирования // – К.: КВИРТУ "Методы расчета эксплуатационной надежности сложных систем". – 1968. – С.50-76.

20. Креденцер Б. П. Об оценке надежности систем с восстановлением при законах распределения отличающихся от экспоненциальных // – К.: КВИРТУ. Труды № 44. – 1968. – С. 124-131.