

ISSN 0005-2310

# **А Т АВТОМАТИКА И МЕЛЕМЕХАНИКА**



•Наука•

**7**  
**1999**

Российская академия наук

# **А Т АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА**

Журнал основан в 1936 году

Выходит 12 раз в год



# 7

ИЮЛЬ

·Наука·Москва

**1999**

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор академик РАН Н.А. Кузнецов,

заместители главного редактора:

академик РАН А.А. Красовский,

член-корр. РАН П.П. Пархоменко,

ответственный секретарь д-р техн. наук В.А. Лотоцкий,

академик РАН С.В. Емельянов, академик АН Грузии И.В. Прангишвили,  
д-ра техн. наук Ф.Т. Алескеров, В.Н. Буков, В.М. Вишнеvский, Б.Г. Волик,  
О.П. Кузнецов, В.В. Кульба, Л.А. Мироновский, В.Н. Новосельцев, Б.Т. Поляк,  
Ю.С. Попков, А.И. Пропой, Е.С. Пятницкий, д-ра физ.-мат. наук Н.А. Бобылев,  
А.И. Кибзун, В.Б. Колмановский, Б.М. Миллер, В.В. Рыков, А.П. Уздемир,  
канд. техн. наук А.П. Курдюков, Б.В. Лункин,  
канд. физ.-мат. наук В.И. Венец, П.Ю. Чеботарев

В 1999 г. журнал получает финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 95-01-90012)

Адрес редакции: 117806, ГСП. Москва, В-342, Профсоюзная ул., 65

Тел. 334-87-70

Зав. редакцией *П.Е. Шрага*

---

©Российская академия наук.

Отделение проблем машиностроения, механики и процессов управления,  
Институт проблем управления,  
Институт проблем передачи информации, 1999 г.

УДК 681.324

© 1999 г. С. П. СУЩЕНКО, канд. техн. наук  
(Томский государственный университет)

## О ВЛИЯНИИ БЛОКИРОВОК БУФЕРНОЙ ПАМЯТИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МНОГОЗВЕННОГО ТРАКТА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Предложена модель тракта передачи данных, состоящего из нескольких участков переприема и имеющего ограниченные буферные накопители в транзитных узлах, в виде открытой сети систем массового обслуживания с дискретным временем. Получена нижняя граница пропускной способности, соответствующая единичным значениям буферных накопителей. Найдено влияние произвольного числа абсолютно надежных каналов связи, расположенных между двумя недетерминированными участками переприема заданного качества, на операционные показатели сквозного соединения.

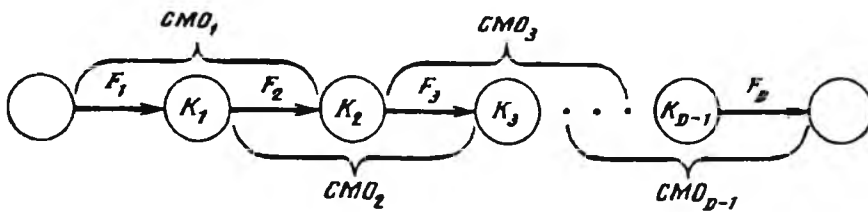
### 1. Введение

Важнейшими операционными характеристиками многозвенных виртуальных каналов сетей с коммутацией пакетов [1] являются их пропускная способность и средняя сквозная задержка протокольных блоков данных. Данные показатели определяются не только достоверностью передачи данных на каждом участке переприема, но и объемом буферных накопителей для приема пакетов данных в транзитных узлах. Известные подходы к анализу этих показателей производительности в сетях связи [1–4] ориентированы на модели в виде сети систем массового обслуживания (СМО) с непрерывным временем при заданных распределениях входных потоков и времени передачи протокольных блоков данных. Поскольку в основе управляющих процедур протоколов линейного уровня лежат алгоритмы с решающей обратной связью [1], то более адекватным описанием реальных процессов информационного переноса в сетях пакетной коммутации являются системы с дискретным временем. В данной работе на основе модели тракта в виде сети СМО с дискретным временем и ограниченным накопителем анализируется влияние фактора блокировок на его операционные характеристики.

### 2. Математическая модель тракта

Рассмотрим тракт передачи данных, состоящий из  $D$  последовательных звеньев (рисунок). Будем считать, что обмен в каждом звене выполняется полными информационными пакетами в соответствии со стартстопной протокольной процедурой [1]. Длительности цикла передачи пакета  $T$  от начала вывода его в линию связи до момента получения квитанции линейного уровня будем полагать одинаковыми на всех участках переприема, а буферные накопители транзитных узлов тракта – ограниченными размерами  $K_d$ ,  $d = 1, D - 1$ .

При заполненном буферном накопителе узла-приемника любого из участков переприема пакеты отвергаются и передаются повторно узлом-отправителем согласно управляющей процедуре стартстопного протокола. Считаем также, что достоверность передачи пакетов в  $d$ -м звене равна  $F_d$ , а количество повторных передач из-за искажений информационных пакетов и подтверждений, а также блокировок буфер-



Многозвенный тракт передачи данных

ной памяти – не ограничено. При этом время безошибочной передачи пакета по каждому звену является случайной величиной, кратной  $T$  и имеющей геометрический закон распределения с параметром  $F_d$ .

Полагаем, кроме того, что передающий узел первого звена всегда имеет пакеты для отправки вдоль рассматриваемого тракта, а в транзитных узлах к основному трафику не добавляются “боковые” потоки. Тогда процесс информационного переноса в многозвенном тракте передачи данных описывается открытой марковской сетью из  $D - 1$  дискретных СМО [4], интенсивность входного потока в которую определяется величиной  $F_1/T$ , а интенсивность обслуживания в каждой  $d$ -й СМО ( $d = \overline{1, D-1}$ ) – значением  $F_{d+1}/T$  (см. рисунок).

Поскольку рассматривается тракт с ограниченными размерами очередей в транзитных узлах, то выходные потоки каждой дискретной СМО не будут марковскими [5]. В силу этого такая сеть не может анализироваться как совокупность независимых марковских дискретных СМО, а должна описываться вложенной цепью Маркова в пространстве размерности  $D - 1$  с числом состояний, равным произведению  $\prod_{d=1}^{D-1} (K_d + 1)$ .

Обозначим через  $\pi_A^B$  переходные вероятности цепи Маркова из состояния  $A$  в состояние  $B$ , где  $A = i_{D-1}i_{D-2}, \dots, i_1$ ;  $B = j_{D-1}j_{D-2}, \dots, j_1$ ;  $i_d = \overline{0, K_d}$ ;  $j_d = \overline{0, K_d}$ ;  $d = \overline{1, D-1}$  –  $D - 1$ -разрядные номера соответственно исходного и измененного состояний цепи Маркова в  $D - 1$ -мерном пространстве с мощностью множества значений в  $d$ -м разряде ( $d$ -м измерении пространства), равной  $K_d + 1$ , а через  $P_A$  – стационарные вероятности состояний цепи Маркова. Пусть  $M$  – множество всех возможных состояний цепи Маркова. Тогда в стационарных условиях цепь Маркова удовлетворяет системе уравнений равновесия

$$(1) \quad P_A = \sum_{B \in M} P_B \pi_A^B, \quad A \in M.$$

Пропускная способность тракта длины  $D$  определится средней величиной пропущенного (обслуженного) потока

$$(2) \quad Z_D(K_1, \dots, K_{D-1}) = \frac{F_D}{T} \sum_{i_1=0}^{K_1} \dots \sum_{i_{D-2}=0}^{K_{D-2}} \sum_{i_{D-1}=1}^{K_{D-1}} P_{i_{D-1}, \dots, i_1}.$$

Показатель средней сквозной задержки пакета складывается из времени попадания в сеть СМО (времени передачи по первому звену) и времени обслуживания в сети СМО (времени передачи по остальным звеньям до попадания в узел-получатель  $D$ -го участка переприема с учетом наличия очередей в транзитных узлах) [4]

$$(3) \quad T_D(K_1, \dots, K_{D-1}) = \frac{1 + \bar{K}_D}{Z_D(K_1, \dots, K_{D-1})},$$

где  $\bar{K}_D$  – среднее число пакетов во всех транзитных узлах тракта передачи данных (в сети СМО)

$$\bar{K}_D = \sum_{i_1=0}^{K_1} \dots \sum_{i_{D-1}=0}^{K_{D-1}} \sum_{d=1}^{D-1} i_d P_{i_{D-1}, \dots, i_1}.$$

Дальнейший анализ проведем в предположении  $T = 1$ .

### 3. Анализ трехзвенного тракта

Начнем рассмотрение с тракта передачи данных, состоящего из трех участков переприема с буферами произвольного размера в транзитных узлах. Вид переходных вероятностей цепи Маркова, описывающей процесс транспортировки по такому тракту, приведен в табл. 1.

При  $K_1 = K_2 = 1$  решение (1) имеет вид

$$P_{00} = \frac{F_2 F_3^2 (1 - F_1)^2}{F_3 (F_1 + F_3 (1 - F_1)) (F_1 + F_2 (1 - F_1)) + F_1^2 F_2 (1 - F_3)};$$

$$P_{01} = P_{00} \frac{F_1 (F_1 (1 - F_2) + F_3 (1 - F_1))}{F_2 F_3 (1 - F_1)^2};$$

$$P_{10} = P_{00} \frac{F_1}{F_3 (1 - F_1)}; \quad P_{11} = P_{00} \frac{F_1^2}{F_3^2 (1 - F_1)^2}.$$

Пропускная способность трехзвенного тракта определится величиной

$$Z_3(1, 1) = \frac{F_1 F_2 F_3 (F_1 + F_3 (1 - F_1))}{F_3 (F_1 + F_3 (1 - F_1)) (F_1 + F_2 (1 - F_1)) + F_1^2 F_2 (1 - F_3)}.$$

Рассмотрим частные случаи этого решения. Нетрудно убедиться в том, что при двух абсолютно надежных каналах ( $F_1 = F_2 = 1$  или  $F_1 = F_3 = 1$ , или  $F_2 = F_3 = 1$ ) пропускная способность трехзвенного тракта определяется достоверностью передачи в третьем ( $F_3$  или  $F_2$ , или  $F_1$ , соответственно).

Для случая, когда первый участок переприема является абсолютно надежным ( $F_1 = 1$ ), пропускная способность принимает вид, совпадающий с выражением данного показателя для двухзвенного тракта [6]

$$(4) \quad Z_3(1, 1) = \frac{F_2 F_3}{F_2 + F_3 (1 - F_2)}.$$

При статистически однородных втором и третьем звеньях тракта передачи данных ( $F_2 = F_3 = F$ ) данное соотношение преобразуется к

$$(5) \quad Z_3(1, 1) = F / (2 - F).$$

Пропускная способность тракта с детерминированным средним каналом ( $F_2 = 1$ ) принимает следующий вид

$$Z_3(1, 1) = \frac{F_1 F_3 (F_1 + F_3 (1 - F_1))}{F_3 (F_1 + F_3 (1 - F_1)) + F_1^2 (1 - F_3)}.$$

При этом значения  $F_1 = F_3 = F$  приводят к соотношению

$$(6) \quad Z_3(1, 1) = \frac{F(2 - F)}{1 + 2(1 - F)}.$$

Переходные вероятности цепи Маркова для трехзвенного тракта передачи данных

$\pi_{i_2 i_1}^{j_2 j_1}$	$i_2$	$i_1$	$j_2$	$j_1$
$F_1$	0	0	0	1
$F_1(1 - F_2)$	0	$\frac{1, K_1 - 1}{1, K_1}$	0	$i_1 + 1$
$F_2(1 - F_1)$	0	$\frac{1, K_1}{1, K_1}$	1	$i_1 - 1$
$F_1 F_2$	0	$\frac{1, K_1}{1, K_1}$	1	$i_1$
$F_3(1 - F_1)$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	0	$i_2 - 1$	0
$F_1(1 - F_3)$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	0	$i_2$	1
$F_1(1 - F_3)$	$K_2$	$\frac{1, K_1 - 1}{1, K_1 - 1}$	$K_2$	$i_1 + 1$
$F_1 F_3$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	0	$i_2 - 1$	1
$F_3(1 - F_1)(1 - F_2)$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	$\frac{1, K_1 - 1}{1, K_1 - 1}$	$i_2 - 1$	$i_1$
$F_3(1 - F_2)$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	$K_1$	$i_2 - 1$	$K_1$
$F_2 F_3(1 - F_1)$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	$\frac{1, K_1}{1, K_1}$	$i_2$	$i_1 - 1$
$F_2(1 - F_1)(1 - F_3)$	$\frac{1, K_2 - 1}{1, K_2 - 1}$	$\frac{1, K_1}{1, K_1}$	$i_2 + 1$	$i_1 - 1$
$F_1 F_2(1 - F_3)$	$\frac{1, K_2 - 1}{1, K_2 - 1}$	$\frac{1, K_1}{1, K_1}$	$i_2 + 1$	$i_1$
$F_1(1 - F_2)(1 - F_3)$	$\frac{1, K_2 - 1}{1, K_2 - 1}$	$\frac{1, K_1 - 1}{1, K_1 - 1}$	$i_2$	$i_1 + 1$
$F_1 F_3(1 - F_2)$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	$\frac{1, K_1 - 1}{1, K_1 - 1}$	$i_2 - 1$	$i_1 + 1$

Для  $F_3 = 1$  имеем

$$Z_3(1, 1) = \frac{F_1 F_2}{F_1 + F_2(1 - F_1)}$$

Нетрудно видеть, что данное соотношение с точностью до обозначений совпадает с (4).

Из сопоставления (5) и (6) видно, что (6) превышает (5) на величину

$$\Delta = \frac{F(1 - F)^2}{(3 - 2F)(2 - F)},$$

принимаящую максимальное значение при  $F = 0,468$ . Данный факт легко объясняется тем, что абсолютно надежный канал второго звена передачи данных выполняет роль дополнительного буфера для хранения пакетов между первым и третьим участками переприема, снижая тем самым вероятность блокировки буферной памяти.

Для статистически однородного тракта передачи данных ( $F_1 = F_2 = F_3 = F$ ) получаем

$$(7) \quad Z_3(1, 1) = F \frac{1 + (1 - F)}{1 + 3(1 - F) + (1 - F)^2}.$$

При этом показатель средней сквозной задержки пакета, выраженный в длительностях цикла передачи пакета  $T$ , составит

$$T_3(1, 1) = \frac{3 + 6(1 - F) + (1 - F)^2}{F(1 + (1 - F))}.$$

Теперь рассмотрим статистически однородный тракт при  $K_1 = 1$  и произвольном  $K_2$ . Из (1) с учетом условия нормировки можно найти вероятности состояний, а из (2), (3) – операционные показатели тракта. При  $K_2 = 2, 5$  значения пропускной способности и средней сквозной задержки имеют следующий вид

$$\begin{aligned}
 Z_3(1, 2) &= \frac{F\{3 + 3(1 - F) + (1 - F)^2\}}{3 + 7(1 - F) + 4(1 - F)^2 + (1 - F)^3}; \\
 Z_3(1, 3) &= \frac{F\{7 + 8(1 - F) + 4(1 - F)^2 + (1 - F)^3\}}{7 + 16(1 - F) + 12(1 - F)^2 + 5(1 - F)^3 + (1 - F)^4}; \\
 Z_3(1, 4) &= \frac{F\{15 + 20(1 - F) + 13(1 - F)^2 + 5(1 - F)^3 + (1 - F)^4\}}{15 + 36(1 - F) + 33(1 - F)^2 + 18(1 - F)^3 + 6(1 - F)^4 + (1 - F)^5}; \\
 Z_3(1, 5) &= F\{31 + 48(1 - F) + 38(1 - F)^2 + 19(1 - F)^3 + 6(1 - F)^4 + \\
 &+ (1 - F)^5\} / \{31 + 80(1 - F) + 86(1 - F)^2 + 57(1 - F)^3 + \\
 &+ 25(1 - F)^4 + 7(1 - F)^5 + (1 - F)^6\}; \\
 T_3(1, 2) &= \frac{10 + 15(1 - F) + 6(1 - F)^2 + (1 - F)^3}{F\{3 + 3(1 - F) + (1 - F)^2\}}; \\
 T_3(1, 3) &= \frac{25 + 37(1 - F) + 21(1 - F)^2 + 7(1 - F)^3 + (1 - F)^4}{F\{7 + 8(1 - F) + 4(1 - F)^2 + (1 - F)^3\}}; \\
 T_3(1, 4) &= \frac{56 + 89(1 - F) + 63(1 - F)^2 + 29(1 - F)^3 + 8(1 - F)^4 + (1 - F)^5}{F\{15 + 20(1 - F) + 13(1 - F)^2 + 5(1 - F)^3 + (1 - F)^4\}}; \\
 T_3(1, 5) &= \{119 + 209(1 - F) + 180(1 - F)^2 + 101(1 - F)^3 + 38(1 - F)^4 + \\
 &+ 9(1 - F)^5 + (1 - F)^6\} / F\{31 + 48(1 - F) + 38(1 - F)^2 + \\
 &+ 19(1 - F)^3 + 6(1 - F)^4 + (1 - F)^5\}.
 \end{aligned}$$

Предположим теперь, что  $K_1$  – произвольно, а  $K_2 = 1$ . Тогда для пропускной способности имеем

$$Z_3(K_1, 1) = Z_3(1, K_2)$$

при совпадающих здесь  $K_1$  и  $K_2$ . Таким образом, показатель пропускной способности инвариантен к порядку расположения транзитных узлов с буферными накопителями различного объема вдоль статистически однородного тракта передачи данных. В то же время средняя сквозная задержка зависит от этого порядка

$$\begin{aligned}
 T_3(2, 1) &= \frac{11 + 20(1 - F) + 10(1 - F)^2 + 2(1 - F)^3}{F\{3 + 3(1 - F) + (1 - F)^2\}}; \\
 T_3(3, 1) &= \frac{31 + 61(1 - F) + 43(1 - F)^2 + 17(1 - F)^3 + 3(1 - F)^4}{F\{7 + 8(1 - F) + 4(1 - F)^2 + (1 - F)^3\}}; \\
 T_3(4, 1) &= \{79 + 173(1 - F) + 153(1 - F)^2 + 81(1 - F)^3 + 26(1 - F)^4 + \\
 &+ 4(1 - F)^5\} / \{F\{15 + 20(1 - F) + 13(1 - F)^2 + 5(1 - F)^3 + (1 - F)^4\}\}; \\
 T_3(5, 1) &= \{191 + 465(1 - F) + 488(1 - F)^2 + 317(1 - F)^3 + 136(1 - F)^4 + \\
 &+ 37(1 - F)^5 + 5(1 - F)^6\} / \{F\{31 + 48(1 - F) + 38(1 - F)^2 + \\
 &+ 19(1 - F)^3 + 6(1 - F)^4 + (1 - F)^5\}\}.
 \end{aligned}$$

В табл. 2 приведены распределения показателя пропускной способности статистически однородного тракта от достоверности передачи данных в каналах связи  $F$



Распределение значений пропускной способности трехзвенного тракта от достоверности передачи пакета при различных размерах буферных пулов

$F$	$Z_2(1)$	$Z_3(1, 1)$	$Z_3(1, 2)$	$Z_3(1, 3)$	$Z_3(1, 4)$	$Z_3(1, 5)$	$Z_2(2)$	$Z_3(2, 2)$
0,1	0,052	0,042	0,049	0,051	0,052	0,052	0,069	0,060
0,2	0,111	0,089	0,103	0,108	0,110	0,111	0,142	0,125
0,3	0,176	0,142	0,164	0,172	0,174	0,176	0,222	0,196
0,4	0,250	0,202	0,233	0,243	0,247	0,249	0,307	0,274
0,5	0,333	0,272	0,311	0,324	0,330	0,332	0,400	0,361
0,6	0,428	0,356	0,402	0,417	0,424	0,427	0,500	0,457
0,7	0,538	0,457	0,509	0,526	0,533	0,536	0,608	0,535
0,8	0,666	0,585	0,637	0,654	0,661	0,664	0,727	0,689
0,9	0,818	0,755	0,796	0,808	0,813	0,816	0,857	0,831

Таблица 3

Зависимость значений средней сквозной задержки пакета в трехзвенном тракте от достоверности передачи пакета, объемов буферных накопителей и их расположения

$T_2(K_1, K_2)$	$F$								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$T_2(1, 2)$	44,68	21,81	14,18	10,36	8,05	6,51	5,39	4,55	3,88
$T_2(1, 3)$	44,62	21,87	14,28	10,46	8,20	6,67	5,57	4,75	4,10
$T_2(1, 4)$	44,76	21,99	14,40	10,60	8,32	6,80	5,71	4,89	4,25
$T_2(1, 5)$	45,18	22,21	14,56	10,73	8,44	6,91	5,81	4,99	4,35
$T_2(2, 1)$	59,23	28,50	18,24	13,10	10,00	7,92	6,43	5,29	4,40
$T_2(3, 1)$	74,35	35,59	22,66	16,19	12,30	9,70	7,83	6,42	5,32
$T_2(4, 1)$	91,38	43,60	27,66	19,69	14,90	11,71	9,42	7,69	6,35
$T_2(5, 1)$	109,41	52,09	32,98	23,42	17,68	13,85	11,11	9,05	7,45

при различных значениях  $K_2$ . Отсюда видно, что с ростом  $K_2$  пропускная способность трехзвенного тракта  $Z_3(1, K_2)$  быстро стремится к теоретическому пределу  $Z_2(1)$  [6], практически достигая его при  $K_2 = 5$ .

Из табл. 3, иллюстрирующей асимметричность величин  $T_2(K_1, K_2)$ , нетрудно видеть, что для убывающего порядка объемов буферных накопителей вдоль направления передачи средняя сквозная задержка превышает значения данного показателя для обратного расположения транзитных узлов.

Рассмотрим однородный тракт при  $K_1 = K_2 = 2$ . Вероятности состояний цепи Маркова, описывающей тракт передачи данных с такими параметрами, имеют следующий вид

$$P_{00} = \frac{(1-F)^2 G}{24 + 46(1-F) + 35(1-F)^2 + 21(1-F)^3 + 8(1-F)^4 + (1-F)^5};$$

$$P_{01} = P_{00} \frac{6 + 3(1-F) + 4(1-F)^2 + 2(1-F)^3}{(1-F)G};$$

$$P_{02} = P_{00} \frac{14 + 9(1-F) + 5(1-F)^2 + 2(1-F)^3}{(1-F)G};$$

$$\begin{aligned}
P_{10} &= P_{00} \frac{1}{1-F}; & P_{11} &= P_{00} \frac{6+5(1-F)+5(1-F)^2+2(1-F)^3}{(1-F)^2 G}; \\
P_{12} &= P_{00} \frac{8+4(1-F)+2(1-F)^2+(1-F)^3}{(1-F)^2 G}; \\
P_{20} &= P_{00} \frac{4+2(1-F)+2(1-F)^2+(1-F)^3}{(1-F) G}; \\
P_{21} &= P_{00} \frac{4+4(1-F)+3(1-F)^2+(1-F)^3}{(1-F)^2 G}; \\
P_{22} &= P_{00} \frac{1}{(1-F)^2}; & G &= 6+3(1-F)+2(1-F)^2+(1-F)^3.
\end{aligned}$$

Операционные характеристики определяются выражениями:

$$\begin{aligned}
Z_3(2, 2) &= \frac{F\{24+26(1-F)+17(1-F)^2+9(1-F)^3+2(1-F)^4\}}{24+46(1-F)+35(1-F)^2+21(1-F)^3+8(1-F)^4+(1-F)^5}; \\
T_3(2, 2) &= \frac{96+140(1-F)+96(1-F)^2+55(1-F)^3+17(1-F)^4+(1-F)^5}{F\{24+26(1-F)+17(1-F)^2+9(1-F)^3+2(1-F)^4\}}.
\end{aligned}$$

С дальнейшим увеличением  $K_1$  и  $K_2$  структурная сложность аналитического решения стремительно нарастает. Из сопоставления значений  $Z_3(2, 2)$  и  $Z_3(1, K_2)$ ,  $K_2 = \overline{1, 5}$ , приведенных в табл. 2, нетрудно видеть, что равномерное распределение буферов вдоль тракта передачи данных обеспечивает наилучшие значения показателя пропускной способности. Этот факт следует иметь в виду при построении многозвенных соединений.

Предположим теперь, что  $F_2 = 1$ ,  $F_1 = F_3 = F$ , а  $K_1$  и  $K_2$  — произвольны. Тогда множество вероятных состояний образуется совокупностью двух примыкающих геометрических фигур: прямоугольника ( $i = \overline{0, 1}$ ;  $j = \overline{1, K_2}$ ) и отрезка прямой ( $i = \overline{0, K_1}$ ;  $j = K_2$ ). Решение системы уравнений равновесия при этом имеет следующий вид

$$\begin{aligned}
P_{00} &= \frac{(1-F)^2}{1+K_1+K_2-2F}; & P_{j0} &= P_{00} \frac{1}{1-F}, & j &= \overline{1, K_2}; \\
P_{10} &= P_{00} \frac{F}{1-F}; & P_{j1} &= P_{00} \frac{F}{(1-F)^2}, & j &= \overline{1, K_2-1}; \\
P_{K_2 i} &= P_{00} \frac{1}{(1-F)^2}, & i &= \overline{1, K_1}.
\end{aligned}$$

Отсюда находим

$$\begin{aligned}
(8) \quad Z_3(K_1, K_2) &= \frac{F\{K_1+K_2-F\}}{1+K_1+K_2-2F}; \\
T_3(K_1, K_2) &= \frac{K_1(3+K_1+2K_2)+K_2(3+K_2)+2-4F-2F^2}{2F\{K_1+K_2-F\}}.
\end{aligned}$$

Из соотношения (8) видно, что при неограниченном росте  $K_1$  или  $K_2$  пропускная способность  $Z_3(K_1, K_2)$  стремится к величине  $F$ .

#### 4. Анализ тракта длины $D \geq 4$

Рассмотрим виртуальное соединение с числом мест для хранения пакетов в транзитных узлах, равным единице. В силу этого, номера состояний цепи Маркова

Переходные вероятности цепи Маркова для четырехзвенного тракта передачи данных при  $K_1 = K_2 = K_3 = 1$

$\pi_{i_3 i_2 i_1}^{j_3 j_2 j_1}$	$i_3$	$i_2$	$i_1$	$j_3$	$j_2$	$j_1$
$F_1$	0	0	0	0	0	1
$F_2(1 - F_1)$	0	0	1	0	1	0
$F_1 F_2$	0	0	1	0	1	1
$F_1(1 - F_3)$	0	1	0	0	1	1
$F_3(1 - F_1)$	0	1	0	1	0	0
$F_1 F_3$	0	1	0	1	0	1
$F_3(1 - F_2)$	0	1	1	1	0	1
$F_2 F_3(1 - F_1)$	0	1	1	1	1	0
$F_1 F_2 F_3$	0	1	1	1	1	1
$F_4(1 - F_1)$	1	0	0	0	0	0
$F_1 F_4$	1	0	0	0	0	1
$F_1(1 - F_4)$	1	0	0	1	0	1
$F_4(1 - F_2)$	1	0	1	0	0	1
$F_2 F_4(1 - F_1)$	1	0	1	0	1	0
$F_1 F_2 F_3$	1	0	1	0	1	1
$F_2(1 - F_1)(1 - F_4)$	1	0	1	1	1	0
$F_1 F_2(1 - F_4)$	1	0	1	1	1	1
$F_4(1 - F_1)(1 - F_3)$	1	1	0	0	1	0
$F_1 F_4(1 - F_3)$	1	1	0	0	1	1
$F_3 F_4(1 - F_1)$	1	1	0	1	0	0
$F_1 F_3 F_4$	1	1	0	1	0	1
$F_1(1 - F_4)$	1	1	0	1	1	1
$F_4(1 - F_3)$	1	1	1	0	1	1
$F_3 F_4(1 - F_2)$	1	1	1	1	0	1
$F_2 F_3 F_4(1 - F_1)$	1	1	1	1	1	0

представляют собой двоичные числа с количеством разрядов, равным  $D - 1$ . Поскольку каждое звено тракта управляется стартстопной протокольной процедурой, то допустимые изменения состояния соответствуют единичному сдвигу влево некоторого подмножества разрядов исходного номера состояния цепи Маркова. При этом "непередача" пакета данных (в результате искажения в канале связи) из одного транзитного узла в следующий приводит к эффекту "блокировки" (запирания) пакета, находящегося в предыдущем узле. Переходные вероятности цепи Маркова, описывающей процесс транспортировки в передающем тракте из четырех звеньев имеют зависимость от параметров межузловых участков переприема, приведенную в табл. 4. При  $F_d = F$ ,  $d = \bar{1}, 4$  из (1)–(3) находим операционные характеристики тракта передачи данных

$$(9) \quad Z_3(1, 1, 1, 1) = \frac{F\{1 + 3(1 - F) + (1 - F)^2\}}{1 + 6(1 - F) + 6(1 - F)^2 + (1 - F)^3};$$

$$T_4(1, 1, 1, 1) = \frac{4 + 18(1 - F) + 12(1 - F)^2 + (1 - F)^3}{F\{1 + 3(1 - F) + (1 - F)^2\}}.$$

Рассмотрим тракт передачи при  $F_2 = F_3 = 1$ ,  $F_1 = F_4 = F$  и произвольных  $K_d$ ,  $d = \bar{1}, 3$ . Пространство вероятных состояний при этом образуется совокупно-

Переходные вероятности цепи Маркова для четырехзвенного тракта передачи данных при  $F_2 = F_3 = 1$ 

$\pi_{i_3 i_2 i_1}^{j_3 j_2 j_1}$	$i_3$	$i_2$	$i_1$	$j_3$	$j_2$	$j_1$
$F_1$	0	0	0	1	0	0
$1 - F_1$	0	0	1	0	1	0
$F_1$	0	0	1	0	1	1
$1 - F_1$	0	1	0	1	0	0
$F_1$	0	1	0	1	0	1
$1 - F_1$	0	1	1	1	1	0
$F_1$	0	1	1	1	1	1
$F_1(1 - F_4)$	$\frac{1, K_3}{1, K_3}$	0	0	$i_3$	0	1
$F_4(1 - F_1)$	$\frac{1, K_3}{1, K_3}$	0	0	$i_3 - 1$	0	0
$F_1 F_4$	$\frac{1, K_3}{1, K_3}$	0	0	$i_3 - 1$	0	1
$F_4(1 - F_1)$	$\frac{1, K_3}{1, K_3}$	0	1	$i_3 - 1$	1	0
$F_1 F_4$	$\frac{1, K_3}{1, K_3}$	0	1	$i_3 - 1$	1	1
$(1 - F_1)(1 - F_4)$	$\frac{1, K_3}{1, K_3}$	0	1	$i_3$	1	0
$F_1(1 - F_4)$	$\frac{1, K_3}{1, K_3}$	0	1	$i_3$	1	1
$F_4(1 - F_1)$	$\frac{1, K_3}{1, K_3}$	1	0	$i_3$	0	0
$F_1 F_4$	$\frac{1, K_3}{1, K_3}$	1	0	$i_3$	0	1
$(1 - F_1)(1 - F_4)$	$\frac{1, K_3 - 1}{1, K_3 - 1}$	1	0	$i_3 + 1$	0	0
$F_1(1 - F_4)$	$\frac{1, K_3 - 1}{1, K_3 - 1}$	1	0	$i_3 + 1$	0	1
$F_4(1 - F_1)$	$\frac{1, K_3}{1, K_3}$	1	0	$i_3$	1	0
$(1 - F_1)(1 - F_4)$	$\frac{1, K_3 - 1}{1, K_3 - 1}$	1	1	$i_3 + 1$	1	0
$F_1(1 - F_4)$	$\frac{1, K_3 - 1}{1, K_3 - 1}$	1	1	$i_3 + 1$	1	1
$F_1(1 - F_4)$	$K_3$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	0	$K_3$	$i_2$	1
$F_4(1 - F_1)$	$K_3$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	0	$K_3$	$i_2 - 1$	0
$F_1 F_4$	$K_3$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	0	$K_3$	$i_2 - 1$	1
$F_4(1 - F_1)$	$K_3$	$\frac{1, K_2}{1, K_2}$	1	$K_3$	$i_2$	0
$(1 - F_1)(1 - F_4)$	$K_3$	$\frac{1, K_2 - 1}{1, K_2 - 1}$	1	$K_3$	$i_2 + 1$	0
$F_1(1 - F_4)$	$K_3$	$\frac{1, K_2 - 1}{1, K_2 - 1}$	1	$K_3$	$i_2 + 1$	1
$F_1(1 - F_4)$	$K_3$	$K_2$	$\frac{1, K_1 - 1}{1, K_1 - 1}$	$K_3$	$K_2$	$i_1 + 1$
$F_4(1 - F_1)$	$K_3$	$K_2$	$\frac{1, K_1}{1, K_1}$	$K_3$	$K_2$	$i_1 - 1$

стью трех примыкающих геометрических фигур: прямоугольного параллелепипеда ( $i = 0, 1; j = 0, 1; k = 0, K_3$ ), прямоугольника ( $i = 0, 1; j = 0, K_2; k = K_3$ ) и отрезка прямой ( $i = 0, K_1; j = K_2; k = K_3$ ). Переходные вероятности цепи Маркова для данного тракта приведены в табл. 5. Вероятности состояний определяются следующими зависимостями:

$$P_{000} = \frac{(1 - F)^3}{1 + K_1 + K_2 + K_3 - 3F}; \quad P_{k00} = P_{000} \frac{1}{1 - F}, \quad k = \overline{1, K_3};$$

$$P_{k01} = P_{000} \frac{F}{(1 - F)^2}, \quad k = \overline{1, K_3}; \quad P_{k10} = P_{000} \frac{F}{(1 - F)^2}, \quad k = \overline{1, K_3 - 1};$$

$$P_{k11} = P_{000} \frac{F^2}{(1 - F)^3}, \quad k = \overline{1, K_3 - 1}; \quad P_{K_3 j 0} = P_{000} \frac{1}{(1 - F)^2}, \quad j = \overline{1, K_2};$$

$$P_{K_3 j 1} = P_{000} \frac{F}{(1 - F)^3}, \quad j = \overline{1, K_2 - 1}; \quad P_{K_3 K_2 i} = P_{000} \frac{1}{(1 - F)^3}, \quad i = \overline{1, K_1}.$$

Переходные вероятности цепи Маркова для  
 пятизвенного тракта передачи данных при  $K_d = 1, D - 1$

$\pi_{i_4 i_3 i_2 i_1}^{j_4 j_3 j_2 j_1}$	$i_4$	$i_3$	$i_2$	$i_1$	$j_4$	$j_3$	$j_2$	$j_1$
$F_1 F_2 F_3 F_4$	0	1	1	1	1	1	1	1
$F_5(1 - F_1)$	1	0	0	0	0	0	0	0
$F_1 F_5$	1	0	0	0	0	0	0	1
$F_1(1 - F_5)$	1	0	0	0	1	0	0	1
$F_5(1 - F_2)$	1	0	0	1	0	0	0	1
$F_2 F_5(1 - F_1)$	1	0	0	1	0	0	1	0
$F_1 F_2 F_5$	1	0	0	1	0	0	1	1
$F_2(1 - F_1)(1 - F_5)$	1	0	0	1	1	0	1	0
$F_1 F_2(1 - F_5)$	1	0	0	1	1	0	1	1
$F_5(1 - F_1)(1 - F_3)$	1	0	1	0	0	0	1	0
$F_1 F_5(1 - F_3)$	1	0	1	0	0	0	1	1
$F_3 F_5(1 - F_1)$	1	0	1	0	0	1	0	0
$F_1 F_3 F_5$	1	0	1	0	0	1	0	1
$F_1(1 - F_3)(1 - F_5)$	1	0	1	0	1	0	1	1
$F_3(1 - F_1)(1 - F_5)$	1	0	1	0	1	1	0	0
$F_1 F_3(1 - F_5)$	1	0	1	0	1	1	0	1
$F_5(1 - F_3)$	1	0	1	1	0	0	1	1
$F_3 F_5(1 - F_2)$	1	0	1	1	0	1	0	1
$F_2 F_3 F_5(1 - F_1)$	1	0	1	1	0	1	1	0
$F_1 F_2 F_3 F_5$	1	0	1	1	0	1	1	1
$F_3(1 - F_2)(1 - F_5)$	1	0	1	1	1	1	0	1
$F_2 F_3(1 - F_1)(1 - F_5)$	1	0	1	1	1	1	1	0
$F_1 F_2 F_3(1 - F_5)$	1	0	1	1	1	1	1	1
$F_5(1 - F_1)(1 - F_3)$	1	1	0	0	0	1	0	0
$F_1 F_5(1 - F_4)$	1	1	0	0	0	1	0	1
$F_4 F_5(1 - F_1)$	1	1	0	0	1	0	0	0
$F_1 F_4 F_5$	1	1	0	0	1	0	0	1
$F_1(1 - F_5)$	1	1	0	0	1	1	0	1
$F_5(1 - F_2)(1 - F_4)$	1	1	0	1	0	1	0	1
$F_2 F_5(1 - F_1)(1 - F_4)$	1	1	0	1	0	1	1	0
$F_1 F_2 F_5(1 - F_4)$	1	1	0	1	0	1	1	1
$F_4 F_5(1 - F_2)$	1	1	0	1	1	0	0	1
$F_2 F_4 F_5(1 - F_1)$	1	1	0	1	1	0	1	0
$F_1 F_2 F_4 F_5$	1	1	0	1	1	0	1	1
$F_2(1 - F_1)(1 - F_5)$	1	1	0	1	1	1	1	0
$F_1 F_2(1 - F_5)$	1	1	0	1	1	1	1	1
$F_5(1 - F_1)(1 - F_4)$	1	1	1	0	0	1	1	0
$F_1 F_5(1 - F_4)$	1	1	1	0	0	1	1	1
$F_4 F_5(1 - F_1)(1 - F_3)$	1	1	1	0	1	0	1	0
$F_1 F_4 F_5(1 - F_3)$	1	1	1	0	1	0	1	1
$F_3 F_4 F_5(1 - F_1)$	1	1	1	0	1	1	0	0
$F_1 F_3 F_4 F_5$	1	1	1	0	1	1	0	1
$F_1(1 - F_5)$	1	1	1	0	1	1	1	1
$F_5(1 - F_4)$	1	1	1	1	0	1	1	1
$F_4 F_5(1 - F_3)$	1	1	1	1	1	0	1	1
$F_3 F_4 F_5(1 - F_2)$	1	1	1	1	1	1	0	1
$F_2 F_3 F_4 F_5(1 - F_1)$	1	1	1	1	1	1	1	0

Для пропускной способности и сквозной задержки справедливо

$$(10) \quad Z_4(K_1, K_2, K_3) = \frac{F\{K_1 + K_2 + K_3 - 2F\}}{1 + K_1 + K_2 + K_3 - 3F};$$

$$T_4(K_1, K_2, K_3) = \frac{K_1(3 + K_1 + 2K_2 + 2K_3) + K_2(3 + K_2 + 2K_3) + K_3(3 + K_3) + 2 - 6F - 6F^2}{2F\{K_1 + K_2 + K_3 - 2F\}}.$$

Рассмотрим тракт передачи данных длины  $D = 5$  с единичным размером буферного накопителя в транзитных узлах. Правила построения переходных вероятностей цепи Маркова, описывающей такой тракт, соответствуют принципам, приведенным в начале данного раздела. Эти вероятности для состояний с 0000 по 0111 совпадают с переходными вероятностями для тракта длины  $D = 4$  (см. табл. 5) с учетом того, что сдвиг влево третьего бита номера состояния при  $D = 5$  не теряется, а остается в пределах разрядной сетки. Для остальных состояний переходные вероятности цепи Маркова приведены в табл. 6. При  $F_d = F$ ,  $d = \bar{1}, \bar{5}$  вероятности состояний имеют вид

$$P_{0000} = \frac{(1 - F)^3}{1 + 10(1 - F) + 20(1 - F)^2 + 10(1 - F)^3 + (1 - F)^4};$$

$$P_{0001} = P_{0000} \frac{4}{1 - F}; \quad P_{0010} = P_{0000} \frac{3}{1 - F}; \quad P_{0100} = P_{0000} \frac{2}{1 - F};$$

$$P_{1000} = P_{0000} \frac{1}{1 - F}; \quad P_{0011} = P_{0000} \frac{6}{(1 - F)^2}; \quad P_{0101} = P_{0000} \frac{5}{(1 - F)^2};$$

$$P_{0110} = P_{0000} \frac{3}{(1 - F)^2}; \quad P_{1001} = P_{0000} \frac{3}{(1 - F)^2}; \quad P_{1010} = P_{0000} \frac{2}{(1 - F)^2};$$

$$P_{1100} = P_{0000} \frac{1}{(1 - F)^2}; \quad P_{0111} = P_{0000} \frac{4}{(1 - F)^3}; \quad P_{1011} = P_{0000} \frac{3}{(1 - F)^3};$$

$$P_{1101} = P_{0000} \frac{2}{(1 - F)^3}; \quad P_{1110} = P_{0000} \frac{1}{(1 - F)^3}; \quad P_{1111} = P_{0000} \frac{1}{(1 - F)^4}.$$

Таким образом, структура решения системы уравнений локального равновесия имеет вид произведения  $P_{0000}$  на отношение целочисленного коэффициента к вероятности искажения данных  $1 - F$ , возведенной в степень, равную количеству требований в сети СМО (числу единиц в номере состояния). Неизвестные целочисленные коэффициенты при этом легко определяются непосредственной подстановкой решения в уравнения равновесия. В рамках такой схемы можно определить распределение вероятностей для тракта произвольной длины с единичным буферным пулом в транзитных узлах. Пропускная способность статистически однородного пятизвенного тракта определяется выражением

$$(11) \quad Z_5(1, 1, 1, 1) = \frac{F\{1 + 6(1 - F) + 6(1 - F)^2 + (1 - F)^3\}}{1 + 10(1 - F) + 20(1 - F)^2 + 10(1 - F)^3 + (1 - F)^4},$$

а средняя сквозная задержка зависимостью

$$T_5(1, 1, 1, 1) = \frac{5 + 40(1 - F) + 60(1 - F)^2 + 20(1 - F)^3 + (1 - F)^4}{F\{1 + 6(1 - F) + 6(1 - F)^2 + (1 - F)^3\}}.$$

При  $F_2 = F_3 = F_4 = 1$ ,  $F_1 = F_5 = F$  вероятности состояний принимают вид

$$P_{0000} = \frac{(1 - F)^3}{5 - 4F}; \quad P_{0001} = P_{0010} = P_{0100} = P_{0000} \frac{F}{1 - F};$$

$$\begin{aligned}
P_{1000} &= P_{0000} \frac{1}{1-F}; & P_{0011} &= P_{0101} = P_{0110} = P_{0000} \frac{F^2}{(1-F)^2}; \\
P_{1001} &= P_{1010} = P_{0000} \frac{F}{(1-F)^2}; & P_{1100} &= P_{0000} \frac{1}{(1-F)^2}; \\
P_{0111} &= P_{0000} \frac{F^3}{(1-F)^3}; & P_{1011} &= P_{0000} \frac{F^2}{(1-F)^3}; \\
P_{1101} &= P_{0000} \frac{F}{(1-F)^3}; & P_{1110} &= P_{0000} \frac{1}{(1-F)^3}; & P_{1111} &= P_{0000} \frac{1}{(1-F)^4}.
\end{aligned}$$

Операционные показатели при этом определяются соотношениями

$$\begin{aligned}
(12) \quad Z_5(1, \dots, 1) &= F \frac{1 + 3(1-F)}{1 + 4(1-F)}, \\
T_5(1, \dots, 1) &= \frac{5 + 4(1-F) + 6(1-F^2)}{F\{1 + 3(1-F)\}}.
\end{aligned}$$

Для трактов передачи данных, состоящих из 6 и 7 участков переприема, аналогичным образом получены переходные вероятности и вероятности состояний цепи Маркова и операционные параметры

$$\begin{aligned}
(13) \quad Z_6(1, \dots, 1) &= \\
&= \frac{F\{1 + 10(1-F) + 20(1-F)^2 + 10(1-F)^3 + (1-F)^4\}}{1 + 15(1-F) + 50(1-F)^2 + 50(1-F)^3 + 15(1-F)^4 + (1-F)^5};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(14) \quad Z_7(1, \dots, 1) &= \\
&= F\{1 + 15(1-F) + 50(1-F)^2 + 50(1-F)^3 + 15(1-F)^4 + \\
&+ (1-F)^5\} / \{1 + 21(1-F) + 105(1-F)^2 + 175(1-F)^3 + 105(1-F)^4 + \\
&+ 21(1-F)^5 + (1-F)^6\}; \\
T_6(1, \dots, 1) &= \\
&= \frac{6 + 75(1-F) + 200(1-F)^2 + 150(1-F)^3 + 30(1-F)^4 + (1-F)^5}{F\{1 + 10(1-F) + 20(1-F)^2 + 10(1-F)^3 + (1-F)^4\}}; \\
T_7(1, \dots, 1) &= \\
&= \{7 + 126(1-F) + 525(1-F)^2 + 700(1-F)^3 + 315(1-F)^4 + 42(1-F)^5 + \\
&+ (1-F)^6\} / \{F\{1 + 15(1-F) + 50(1-F)^2 + 50(1-F)^3 + 15(1-F)^4 + (1-F)^5\}\}
\end{aligned}$$

при  $F_d = F$ ,  $d = \overline{1, D}$ , и

$$(15) \quad Z_6(1, \dots, 1) = F \frac{1 + 4(1-F)}{1 + 5(1-F)};$$

$$(16) \quad Z_7(1, \dots, 1) = F \frac{1 + 5(1-F)}{1 + 6(1-F)};$$

$$T_6(1, \dots, 1) = \frac{6 + 5(1-F) + 10(1-F^2)}{F\{1 + 4(1-F)\}};$$

$$T_7(1, \dots, 1) = \frac{7 + 6(1-F) + 15(1-F^2)}{F\{1 + 5(1-F)\}}$$

в случае  $F_d = 1$ ,  $d = \overline{2, D-1}$ ,  $F_1 = F_D = F$ . Вид соотношений для пропускной способности (5), (6), (12), (15), (16) позволяет обобщить их единой записью для тракта

Распределение значений пропускной способности и ее оценки от достоверности передачи пакета

$F$	$Z_5(1, \dots, 1)$	$Z_6(1, \dots, 1)$	$Z_7(1, \dots, 1)$	$Z_5^*(1, \dots, 1)$	$Z_6^*(1, \dots, 1)$	$Z_7^*(1, \dots, 1)$
0,1	0,035	0,033	0,032	0,034	0,032	0,030
0,2	0,074	0,070	0,068	0,072	0,067	0,064
0,3	0,118	0,113	0,109	0,116	0,108	0,102
0,4	0,169	0,161	0,156	0,166	0,154	0,146
0,5	0,228	0,218	0,211	0,224	0,209	0,198
0,6	0,299	0,286	0,276	0,294	0,275	0,261
0,7	0,387	0,370	0,358	0,382	0,358	0,341
0,8	0,504	0,483	0,468	0,499	0,471	0,449
0,9	0,676	0,651	0,633	0,673	0,643	0,618

произвольной длины  $D$ , содержащего  $D - 2$  последовательных транзитных детерминированных звена передачи данных, находящихся между двумя недетерминированными участками переприема с единичным объемом накопителя в транзитных узлах

$$Z_D(1, \dots, 1) = F \frac{1 + (D - 2)(1 - F)}{1 + (D - 1)(1 - F)}$$

Кроме того, с учетом вида зависимостей (8), (10) пропускная способность тракта, состоящего из детерминированных каналов, находящихся между двумя недетерминированными участками переприема, с произвольным числом буферов в транзитных узлах переписывается следующим образом

$$Z_D(K_1, \dots, K_{D-1}) = F \frac{\sum_{d=1}^{D-1} K_d - F(D - 2)}{1 + \sum_{d=1}^{D-1} K_d - F(D - 1)}$$

Отсюда нетрудно сделать вывод о том, что при построении сетевых трактов передачи данных, состоящих из большого числа участков переприема, надежные каналы связи следует равномерно распределять между звеньями с высоким уровнем искажений. Тем самым эти участки переприема будут играть роль дополнительных буферов между ненадежными звеньями и снижать отрицательный фактор блокировок буферной памяти.

Из вида зависимостей для вероятностей состояний цепи Маркова и пропускной способности статистически однородного тракта передачи данных (7), (9), (11), (13), (14) можно построить нижнюю границу показателя пропускной способности  $Z_D^*(1, \dots, 1) \leq Z_D(1, \dots, 1)$

$$(17) \quad Z_D^*(1, \dots, 1) = F \frac{\sum_{d=0}^{D-2} (1 - F)^d \binom{D-2}{d} \left\{ 1 + \binom{D-2}{d} \right\}}{\sum_{d=0}^{D-1} (1 - F)^d \binom{D-1}{d} \left\{ 1 + \binom{D-1}{d} \right\}}$$

При  $D \leq 4$  данная оценка совпадает с показателем  $Z_D^*(1, \dots, 1)$ . Численные результаты, приведенные в табл. 7, подтверждают то, что для  $D \geq 5$  зависимость (17)



хорошо аппроксимирует снизу пропускную способность многозвенного тракта передачи данных, которая при  $F \leq 1$  монотонно падает с увеличением его длины. Аналогичная оценка сверху для средней сквозной задержки  $T_D^*(1, \dots, 1) \geq T_D(1, \dots, 1)$  имеет вид

$$T_D^*(1, \dots, 1) = \frac{\sum_{d=0}^{D-1} (1-F)^{D-1-d} (d+1) \binom{D-1}{d} \left\{ 1 + \binom{D-1}{d} \right\}}{F \sum_{d=0}^{D-2} (1-F)^d \binom{D-2}{d} \left\{ 1 + \binom{D-2}{d} \right\}}$$

## 5. Заключение

Из анализа предложенной модели установлена целесообразность равномерного распределения буферного пространства среди транзитных узлов и надежных каналов связи между звеньями с высоким уровнем искажений, обеспечивающего наилучшую производительность многозвенного тракта.

Обнаружена инвариантность показателя пропускной способности к порядку расположения транзитных узлов с буферными накопителями различной емкости вдоль статистически однородного тракта передачи данных.

Получена аналитическая оценка нижней границы пропускной способности и оценка сверху средней сквозной задержки многозвенного тракта передачи данных, соответствующие минимальному количеству буферов в транзитных узлах.

Предложена схема поиска распределения вероятностей состояний цепи Маркова, описывающей многозвенный тракт произвольной длины с единичными емкостями транзитных буферных накопителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богуславский Л. Б. Управление потоками данных в сетях ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Жожикашвили В. А., Вишневецкий В. М. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ. М.: Радио и связь, 1988.
3. Башарин Г. П., Бочаров П. П., Коган Я. А. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.
4. Уорлэнд Дж. Введение в теорию сетей массового обслуживания. М.: Мир, 1993.
5. Ивановский В. Б. О свойствах выходных потоков в дискретных системах массового обслуживания // АиТ. 1984. № 11. С. 32-39.
6. Сущенко С. П. О влиянии блокировок буферной памяти на операционные характеристики звена передачи данных // Автоматика и вычисл. техника. 1985. № 6. С. 27-34.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. М. Вишневецким.*

Поступила в редакцию 29.01.98

# СОДЕРЖАНИЕ

## Детерминированные системы

Бобылев Н. А., Булатов А. В. Оценка вещественного радиуса устойчивости линейных бесконечномерных дискретных систем .....	3
Бутковский А. Г. Управление в метрических пространствах .....	11
Гусев С. В., Шишкин С. Л. Алгоритм делящихся эллипсоидов – метод решения систем невыпуклых неравенств .....	25
Жуков В. П. Дивергентные условия асимптотической устойчивости нелинейных динамических систем второго порядка .....	34
Крутова И. Н. Об устойчивости режима стабилизации космического аппарата с учетом упругих колебаний .....	44

## Системы массового обслуживания

Семенюта А. Н. Метод построения модели обслуживания вызовов на участке ведомственной телекоммуникационной сети .....	59
Суценко С. П. О влиянии блокировок буферной памяти на производительность многозвенного тракта передачи данных .....	66
Тихоненко О. М. Распределение суммарного объема в однолинейной системе с экспоненциальным обслуживанием и рекуррентным входным потоком .....	80

## Адаптивные и робастные системы

Ащепков Л. Т., Стегостенко Ю. Б. Стабилизация наблюдаемой линейной дискретной системы с интервальными коэффициентами .....	85
Срагович В. Г. Адаптивная версия линейно-квадратической проблемы для стохастического уравнения Ито .....	96
Честнов В. Н. Синтез регуляторов многомерных систем по заданному радиусу запасов устойчивости на базе процедуры $H_\infty$ -оптимизации .....	100

## Развивающиеся системы

Клепарский В. Г. К оценке интегральных изменений гибкости управления в процессе формирования рыночных отношений .....	110
Новиков Д. А. Устойчивость решений и адекватность детерминированных моделей стимулирования в активных системах .....	115

## Моделирование поведения и интеллекта

Арбузов Д. А., Кукушкин Ю. А., Марасанов А. В. Автомат пилотажных ограничений перегрузки на основе оценки функционального состояния летчика .....	122
---	-----

## Техническая диагностика

Аксенова Г. П., Халчев В. Ф. Декомпозиция для контролепригодного преобразования дискретных устройств .....	131
--	-----

Быков Ю. В., Иванюк А. А., Янушкевич А. И., Ярмолик В. Н. Диагностика неисправностей КМОП-схем на основе lddq-тестирования .....	142
--	-----

### Технические средства в управлении

Попов В. С. Электротепловые измерительные преобразователи активной мощности с повышенными точностью и быстродействием .....	154
---	-----

### Системы автоматизации производственных процессов

Анисимова Н. Г., Круг Е. К. Автоматизация процесса настройки систем управления многосвязными динамическими объектами одного класса в режиме натурального эксперимента .....	164
---	-----

### Заметки

Таранцев А. А. О способе выбора параметров систем массового обслуживания с очередью .....	172
Таташев А. Г. Одна инверсионная дисциплина обслуживания в одноканальной системе с разнотипными заявками .....	177

### Хроника

Рутковский В. Ю. 14-й симпозиум ИФАК "Автоматическое управление в аэрокосмосе" .....	182
--	-----

### Среди книг

Красовский А. А. Рецензия на книгу О. А. Степанова "Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации" .....	185
Информация .....	187

## C O N T E N T S

### Deterministic Systems

Bobylev N. A., Bulatov A. V. Estimation of the Real Stability Radius for Linear Infinite-Dimensional Discrete-Time Systems .....	3
Butkovskii A. G. Control in Metric Spaces .....	11
Gusev S. V., Shishkin S. L. The Algorithm of Dividing Ellipsoids as a Method for Solving Nonconvex Simultaneous Inequalities .....	25
Zhukov V. P. Divergent Conditions of Asymmetric Stability for Nonlinear Dynamic Systems of Second Kind .....	34
Krutova I. N. On the Stability of a Stabilization Mode for a Spacecraft Subjected to Elastic Oscillations .....	44

## Queuing Systems

Semenyuta A. N. A Design Method for a Servicing Model in a Fragment of a Telecommunication Network .....	59
Sushchenko S. P. The Influence of Buffer Memory Locks on the Performance of a Multi-Link Data Transmission Path .....	66
Tikhonenko O. M. The Distribution of the Cumulative Flow in a One-Line System with Exponential Service and Recursive Input Flow .....	80

## Adaptive and Robust Systems

Ashchepkov L. T., Stegostenko Yu. B. Stabilization of an Observable Linear Discrete-Time System with Interval Coefficients .....	85
Sragovich V. G. An Adaptive Version of the LQ Problem for the Stochastic Ito Equation .....	96
Chestnov V. N. The $H_{\infty}$ -Based Controller Design for MIMO Systems Given the Prespecified Radius of Stability .....	100

## Developing Systems

Kleparskii V. G. On the Estimation of Cumulative Changes in Control Flexibility in the Development of Market Relations .....	110
Novikov D. A. Stability of Solutions and the Adequacy of Deterministic Models of Stimulation in Active Systems .....	115

## Simulation of Behavior and Intelligence

Arbuzov D. A., Kukushkin Yu. A., Marasanov A. V. In-Flight Overload Reduction Automaton Based on Estimation of the Pilot's Functional Conditions .....	122
--	-----

## Technical Diagnostics

Aksenova G. P., Khalchev V. F. Decomposition for Testable Transforms of Discrete Devices .....	131
Bykov Yu. V., Ivanyuk A. A., Yanushkevich A. I., Yarmolik V. N. Fault Diagnostics of CMOP Circuits by Means of the Iddq Testing Technology .....	142

## Technical Tools in Control

Popov V. S. High-Accuracy and High-Response Electric-to-Heat Measuring Converters of Active Power .....	154
---	-----

## Control Hardware

Anisimova N. G., Krug E. K. Process Automation in Control System Tuning for a Class of Multiply Connected Dynamic Plants under Natural Experiment .....	164
---	-----

## Notes

Tarantsev A. A. On a Method for Choosing the Service Parameters in Queuing Systems .....	172
Tatashev A. G. An Inverse Service Discipline in a One-Line Queuing System with Heterogeneous Requests .....	177

## Book Review

Krasovski A. A. Review on the Monograph by O. A. Stepanov "Application of Nonlinear Filtering Theory to Data Processing in Navigation" . . . . .	185
Information . . . . .	187

## ПОПРАВКА

К статье А.В. Назина, А.Б. Юдицкого "Достижимые информационные границы в задаче адаптивного управления нелинейными стохастическими системами при непараметрической неопределенности". АИТ. 1999. № 3. С. 180–196.

В параграфе 4 некорректно приведены формулы для оценки  $\hat{\theta}_{2m}$ . Вместо

$$\hat{\theta}_{2m}(x) = \arg \min_{\theta} \sum_{t=m+1}^{2m} (y_t - z_t^T \theta)^2 \chi\{|y_{t-1} - x| \leq h(x)\}$$

и

$$\hat{\theta}_{2m}(x) = \frac{\sum_{t=m+1}^{2m} y_t \chi\{|y_{t-1} - x| \leq h(x)\}}{\sum_{t=m+1}^{2m} \chi\{|y_{t-1} - x| \leq h(x)\}}$$

следует читать соответственно

$$\hat{\theta}_{2m}(x) = \arg \min_{\theta} \sum_{t=m+1}^{2m} (u_{t-1} - y_t - z_t^T \theta)^2 \chi\{|y_{t-1} - x| \leq h(x)\}$$

и

$$\hat{\theta}_{2m}(x) = \frac{\sum_{t=m+1}^{2m} (u_{t-1} - y_t) \chi\{|y_{t-1} - x| \leq h(x)\}}{\sum_{t=m+1}^{2m} \chi\{|y_{t-1} - x| \leq h(x)\}}$$

---

Сдано в набор 12.04.99    Подписано к печати 28.06.99    Формат бумаги 70 × 100 1/16  
 Офсетная печать Усл.печ.л. 15,6    Усл.кр.-отт. 5,9 тыс.    Уч.-изд.л. 18,2    Бум.л. 6,0  
 Тираж 375 экз.    Зак. 2733

---