

УДК 621.3.019.3

**МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА ФОРМИРУЕМЫХ РЕЖИМОВ
ПЕРЕДАЧИ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА В
ШИРОКОПОЛОСНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ**

М.М. ЛАСТОВЧЕНКО, Ю.Н. БЕРНАЦКАЯ, А.Н. ВИТВИЦКИЙ

Рассмотрена методология системного анализа процессов передачи мультимедийного трафика в сетях АТМ в виде многоканальных систем синхронной передачи. Введен интегральный критерий анализа процессов квантования трафика для обеспечения требуемой своевременности его передачи с учетом надежности функционирования. Сущность системного анализа иллюстрируется графиками.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы создания информационного пространства Украины как составляющей части Глобального Европейского [1], требуют существенной реорганизации телекоммуникаций и в первую очередь строительства интеллектуальных сетей (ИС), базирующихся на широкополосных транспортных платформах (ШТП) [4–5]. Эффективность функционирования таких ИС, в основу которых положен асинхронный метод передачи (АТМ), всецело зависит от требуемого качества передачи мультимедийной информации: верности и своевременности [4, 5]. Особо жесткие требования предъявляются к сетям, поддерживающим режимы видеоконференцсвязи [6].

Недостаточная надежность виртуальных путей (ВП), состоящих из линий связи (ЛС) сети в виде многоканальных систем (МКС), даже в режиме нормального функционирования поддерживающих заданное качество, приводит к тому, что фактическая пропускная способность ЛС оказывается намного ниже потенциальной (соответствующей идеальной надежности). Эти потери пропускной способности связаны с восстановлением как верности битового потока повторными передачами, так и восстановлением работоспособности ЛС, потеря которой обусловлена сбоями в ее каналах. При этом чем выше требования к своевременности (синхронности) и верности передачи мультимедийного трафика (ММТ), тем сложнее обеспечить надежность ЛС. Взаимовлияние этих противоречивых требований определяет требования к рациональному введению аппаратной и временной избыточности [7–9]. Например, при передаче данных необходима высокая верность при относительно низких требованиях к своевременности и наобо-

рот — качество речевого трафика при относительно слабых требованиях к верности всецело зависит от своевременности передачи «речевых» пакетов [6]. Вместе с тем, и в том и другом случае должна обеспечиваться и требуемая надежность функционирования МКС, и заданная синхронизация ММТ [5–7].

Таким образом, возникает необходимость в таком системном анализе эффективности функционирования каждой ЛС сети, когда введение временной избыточности было бы рационально дифференцировано (для обеспечения заданной верности и своевременности передачи пакетов, а также надежности функционирования ее каналов). В известных работах [7–17] при анализе эффективности функционирования своевременность [16, 17] и надежность [7–15] рассматривались автономно. В работах [7, 14] в модель анализа надежности функционирования введены допустимые пороги для временных перерывов в процессе передачи ММТ. При этом процесс адаптивного управления надежностью функционирования определялся наперед заданными допустимыми порогами времен подключения резервных каналов (или восстановления каналов) с учетом дополнительного времени для повторной передачи ММТ [7].

Цель предлагаемой работы заключается в создании такой модели системного анализа, которая дифференцировала бы введение временной избыточности, одновременно обеспечивая требования и своевременности синхронной передачи, а также надежности функционирования.

ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПЕРЕДАЧИ ММТ В СЕТЯХ АТМ/SDH

Как показано в работах [5,7,14], при обеспечении жестких требований к качеству обслуживания процессов передачи ММТ (QoS синхронности с заданной задержкой и допустимой ошибочностью для обеспечения верности) (см. таблицу) в сетях АТМ/SDH первоочередная задача — повышение надежности функционирования ЛС за счет введения аппаратного и временного резервирования при минимальных затратах дорогостоящих аппаратных средств. В настоящей работе приоритетной является задача синхронизации, хотя в некоторых случаях они равнозначны.

Допустимые значения ошибок, потерь и задержек с учетом введения в пакеты информационной избыточности

Тип трафика	Требуемые допустимые значения		
	ошибки битов	доля потерь пакетов	времени задержки при передаче пакета
Передача данных	10^{-7}	10^{-6}	1000 мс
Речь с высокой степенью воспроизведения	10^{-5}	10^{-7}	500 мс
Видео с высокой точностью	10^{-6}	10^{-8}	300 мс

Вначале рассмотрим процессы функционирования ЛС сети АТМ. Сеть АТМ базируется на физическом уровне, поддерживаемом сетью SDH. Со-

пряжение этих сетей осуществляется на подуровне ВП ATM и тракта передачи SDH (рис. 1) [3–5].

Подуровень, зависящий от физической среды, определяет скорость, с которой ММТ ATM транспортируется через физическую среду. Подуровень конвергенции с системой передачи является частью физического уровня. Он определяет протокол размещения ячеек для передачи через физическую среду в кадрах SDH так называемых пакетов ячеек [3, 5].

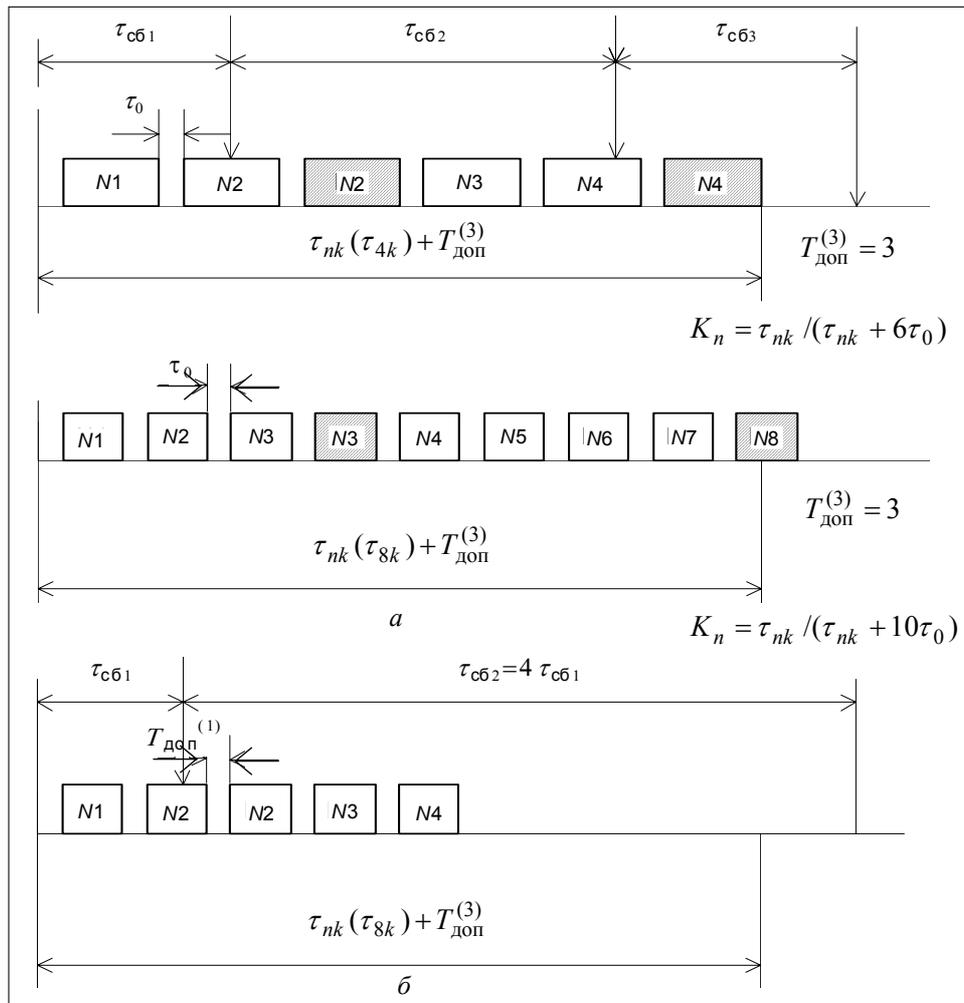


Рис. 1. Временные эпюры процесса передачи пакетов (τ_{cb} — случайное время сбоя; τ_0 — время контроля безошибочности)

Физический уровень с точки зрения системы передачи принято делить на слои регенераторной секции, усилительного участка, цифрового тракта связи. Для систем SDH эти понятия совпадают со слоем регенераторной секции, мультиплексорной секции и цифрового тракта (пути передачи).

Взаимовлияние стохастических процессов (передачи различных объемов ММТ и случайных сбоев или отказов каналов, составляющих ЛС) обуславливается аритмией ММТ и недостаточной надежностью каналов ЛС. Случайный поток сбоев приводит или только к повторной передаче, или к повторным передачам после подключения резервного канала вместо отка-

завшего, или к повторным передачам с восстановлением и подключением (при отсутствии резерва). Во всех этих случаях происходит увеличение времени передачи ММТ, превышающего допустимые задержки. В этих случаях своевременность падает, и, следовательно, синхронность режимов нарушается.

В тех случаях, когда обеспечить необходимую для своевременной передачи пакета ячеек ММТ надежность функционирования МКС не удастся, пакет ячеек разбивается на равные части (контейнеры ММТ [3–5]), которые передаются последовательно. Для обеспечения синхронности передачи ММТ назначаются моменты t_k завершения передачи каждого контейнера или $t_{нк}$ завершения передачи пакета, состоящего из n кадров.

Таким образом, представляя МКС, состоящую из двух частей, одна из которых передает трафик с заданным качеством, а другая находится в готовности к передаче или восстанавливается, можно рассматривать два метода обеспечения синхронности: введение приоритетного обслуживания ММТ [18] или разбиение пакета на контейнеры (с учетом передачи с повторами), и два метода обеспечения надежности функционирования: за счет введения временной или аппаратно-временной избыточностей [13–15].

По мере развития математического аппарата была введена частичная дифференциация временной избыточности (пополняемый и не пополняемый резерв времени [13]), а также одновременное введение аппаратной и временной избыточностей [14]. Однако методологии системного анализа взаимосвязанных процессов синхронной передачи и поддержания надежности в рамках многоуровневой архитектуры их взаимодействия, где требуется дифференцированное введение и временной избыточности, и коррекции режимов синхронизации, насколько известно авторам, пока не существует.

Основным требованием, предъявляемым к методологии системного анализа, является адекватность модели анализа реальным процессам передачи контейнеров с повторами ошибочных. В этом случае количественный анализ взаимосвязанных процессов (синхронной передачи пакетов на канальном уровне (уровне АТМ [3,5]), на физическом уровне SDH [19] и с восстановлением работоспособности при сбоях/отказах каналов ЛС [7]) будет способствовать обеспечению необходимой точности.

В качестве критериев обслуживания QoS, обеспечивающих необходимую синхронность и надежность функционирования МКС, можно выбрать следующие:

- вероятность эффективного функционирования ЛС, обусловленная своевременностью передачи ММТ с заданной синхронностью (заданными допустимыми задержками CDVT[6,7]);
- среднее время нормального функционирования, в течение которого ЛС обеспечивает передачу контейнеров с заданной верностью, поддерживаемой повторами потерянных (ошибочных) CLRT (см. таблицу) [7].

В свою очередь, для определения критерия надежности необходимо сформулировать такие понятия, как отказ (сбой, приведший к повторам и не требующий восстановления канала), групповой сбой или отказ, требующий и повтор, и восстановления резервированием канала, а также срыв нормального функционирования (отказ, последствия которого привели к паде-

нию качества передачи (QoS) ниже допустимого уровня). В соответствии с работой [2] для обеспечения качества (допустимых искажений и задержек), задаваемого параметрами ММТ (ритмичности и своевременности [7, 17]), можно ввести временную избыточность:

1) допустимое время $T_{\text{доп}}^{(1)}$ повторов и подключения резервного канала $\tau_{\text{п}} \leq T_{\text{доп}}^{(1)}$ или восстановления с последующим подключением $\Delta\tau_{\text{в}} \leq T_{\text{доп}}^{(1)}$;

2) допустимое время задержки передачи контейнера $T_0^{\text{к}} + T_{\text{доп}}^{(2)}$ с учетом времени повтора, подключений и восстановления $\tau_{\text{к}} \leq t_{\text{к}} = T_0^{\text{к}} + T_{\text{доп}}^{(2)}$ ($T_0^{\text{к}}$ — время передачи контейнера при идеальной надежности виртуальных каналов — ВК);

3) допустимое время задержки в передаче, состоящей из набора n контейнеров $T_0^{n\text{к}} + T_{\text{доп}}^{(3)}$: $\tau_{n\text{к}} \leq t_{n\text{к}} = T_0^{n\text{к}} + T_{\text{доп}}^{(3)}$ ($T_0^{n\text{к}}$ — время передачи пакета из n контейнеров при идеальной надежности ВК).

Здесь $\tau_{\text{п}}$, $\tau_{\text{к}}$, $\tau_{n\text{к}}$ — случайные времена подключения резервного канала, передачи контейнера и пакета (набора из n контейнеров), соответственно. Не менее важной предпосылкой является рассмотрение методов автономного (независимого) анализа введения каждого из указанных видов временной избыточности.

В работах [7, 14] предложена модель введения аппаратно-временной избыточности, где критерием срыва являются $\tau_{\text{п}} > T_{\text{доп}}^{(1)}$ или $\tau_{\text{в}} > T_{\text{доп}}^{(1)}$ ($\tau_{\text{в}}$ — время восстановления) или выход из строя $(M+1)$ -го резервного канала с полным выключением ЛС. В работах [15, 16] это ограничение снято (ЛС непрерывно функционирует), но не учитывается расход времени, связанный с квантованием процесса и повтором отдельных квантов и контейнеров. И, наконец, можно использовать модели [16, 17], хотя в них и не учитываются факторы своевременного подключения резерва и/или восстановления. Вместе с тем в [16] учитывается и своевременность, и упорядоченность передачи квантов ММТ с заданной своевременностью $\tau_{n\text{к}} \leq T_0^{n\text{к}} + T_{\text{доп}}^{(3)}$, а в [17] учитывается дополнительная временная избыточность, необходимая для восстановления (повторов) порций разрушенной информации.

Сущность модели системного анализа влияния процессов квантования и резервирования можно раскрыть, используя временные эпюры процесса передачи (рис. 1) для случаев снижения времени задержки за счет более мелкого квантования пакета (рис. 1, а) и за счет перехода на резервный канал с более высокой безотказностью (рис. 1, б).

Как следует из рис. 1, а, за счет повышения степени квантования (вместо $n=4$ вводится $n=8$) удается уменьшить задержку передаваемого пакета, но при этом теряется полезная степень использования канала. Лучшим вариантом можно считать переход (подключение вместо ненадежного) на канал с более высокой безотказностью $\tau_{\text{сб2}} \geq 4\tau_{\text{сб1}}$ (рис. 1, б).

Таким образом, исходя из изложенного, необходимыми предпосылками для формирования модели системного анализа является использование:

- двухуровневой архитектуры ЛС (канальный уровень АТМ, физический уровень SDH [3]) и формализованного описания процессов его функционирования с учетом возникновения отказов (сбоев);
- критериев синхронизации ММТ и надежности функционирования ЛС [6, 7];
- параметров стохастических процессов функционирования: случайные времена появления сбоев $\tau_{сб}$, восстановлений $\tau_{в}$ и подключений каналов $\tau_{п}$, а также передачи контейнеров $\tau_{к}$ и пакетов $\tau_{н.к}$ с допустимыми пределами синхронизации временных избыточностей $T_{доп}^{(1)}$, $T_{доп}^{(2)}$, $T_{доп}^{(3)}$ [13–15].

Модель системного анализа должна обеспечивать оптимизацию режимов квантования ММТ, повышая эффективность функционирования ЛС путем оптимального распределения временной избыточности, а именно, синхронность при передаче контейнеров с необходимой своевременностью передачи пакетов, а также надежность ЛС с «быстрым» подключением резервных каналов $\tau_{п} \leq T_{доп}^{(1)}$ или $\Delta\tau_{в} \leq T_{доп}^{(1)}$.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ТРЕБОВАНИЯМИ СВОЕВРЕМЕННОСТИ И НАДЕЖНОСТИ

Взаимозависимые процессы функционирования каналов ЛС в рамках архитектуры сети АТМ [3,4,19] представлены тремя уровнями:

1. Уровень адаптации. Наполнение ячеек АТМ составляющими ММТ компонентами (данные, видео, речь), определяющими ритмичность передачи.
2. Канальный уровень — уровень АТМ (рис. 2). Мультиплексирование и передача. Каждый контейнер ячеек должен быть передан за время $\tau_{к} \leq T_0^k + T_{доп}^{(2)}$, а своевременность передачи всего набора контейнеров (пакета) должна быть в пределах времени $\tau_{н.к} \leq T_0^{н.к} + T_{доп}^{(3)}$.
3. Физический уровень — уровень SDH (рис. 2). Передача с заданной верностью битового потока за счет обеспечения требуемой надежности функционирования, которая определяется средним временем нормального функционирования $T_{н.ф}(T_{доп}^{(1)})$ каналов ЛС при условии, что времена подключения резервных каналов $\tau_{п}$ или оставшееся время их восстановления и подключения $\Delta\tau_{в}$ будет меньше допустимого $T_{доп}^{(1)}$ ($\tau_{п} \leq T_{доп}^{(1)}$ или $\Delta\tau_{в} \leq T_{доп}^{(1)}$).

Физический уровень (уровень SDH) является базисным уровнем ШТП ИС, который реализует функции передачи битовых потоков ($F1, F2, F3$). При заданном наполнении ячеек (уровень адаптации) сущность взаимовлияния процессов канального и физического уровней может быть представлена вложением процесса передачи битового потока (физический уровень с учетом подключения и восстановления каналов) в процессы мультиплексирования и передачи контейнеров или пакетов (канальный уровень, обеспечивающий заданную синхронность ММТ необходимой своевременностью передачи).

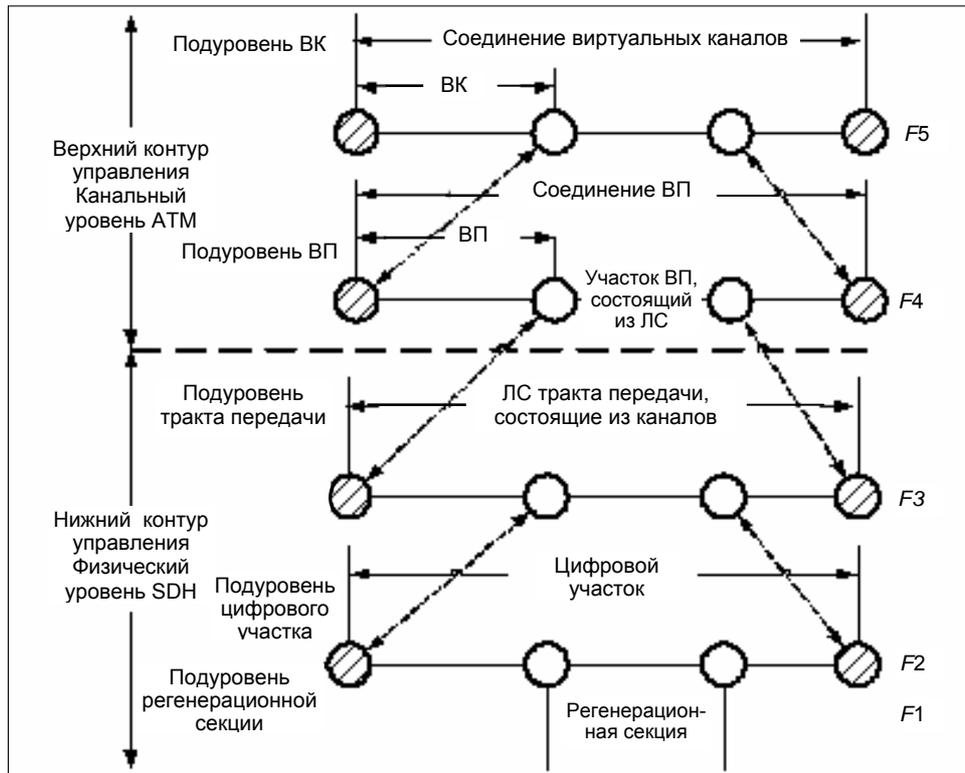


Рис. 2. Эталонная модель архитектуры канального и физического уровней: F1 — битовый поток уровня регенерации секции SDH; F2 — битовый поток уровня цифровой (мультиплексорной) секции синхронной цифровой иерархии SDH; F3 — битовый поток уровня передачи SDH; F4 — поток пакетов MMT ВП уровня ATM; F5 — поток пакетов MMT ВК уровня ATM; ⊗ — окончательные и ○ — промежуточные системы

Взаимовлияние процессов можно иллюстрировать формальной моделью на примере ЛС, состоящей из двух основных ($N = 2$) и одного резервного ($M = 1$) каналов (рис. 3).

На рис. 3 показаны временные эпюры процессов и передачи контейнеров на канальном уровне для случая, когда пакет разбит на четыре порции (набор из четырех контейнеров). Здесь требуется поддерживать синхронность трафика, обеспечивая $\tau_{ki} \leq t_{ki}$. Показаны пять моментов отказов: 1, 2 и 4-й характеризуют нормальное функционирование $\tau_{\Pi} \leq T_{\text{доп}}^{(1)}$ или $\Delta\tau_{\text{в}} \leq T_{\text{доп}}^{(1)}$, где $\Delta\tau_{\text{в}}$ — остаточное время восстановления с подключением, а 3-й и 5-й — срыв функционирования. Знаком ⊕ показано время ненормального функционирования, стрелками — переходы (выход канала на ремонт, подключение резервного или отремонтированного канала).

Таким образом, случайный характер этих взаимозависимых процессов (синхронной передачи и поддержания надежного непрерывного функционирования без срывов) определяется:

- неравномерной (случайной) загрузкой ячеек контейнеров с возможными последующими повторами после сбоев, не требующих подключения резерва;

- сбоями (отказами), локализуемыми за счет подключения (восстановления) резерва за допустимое время без срыва нормального (непрерывного) функционирования;

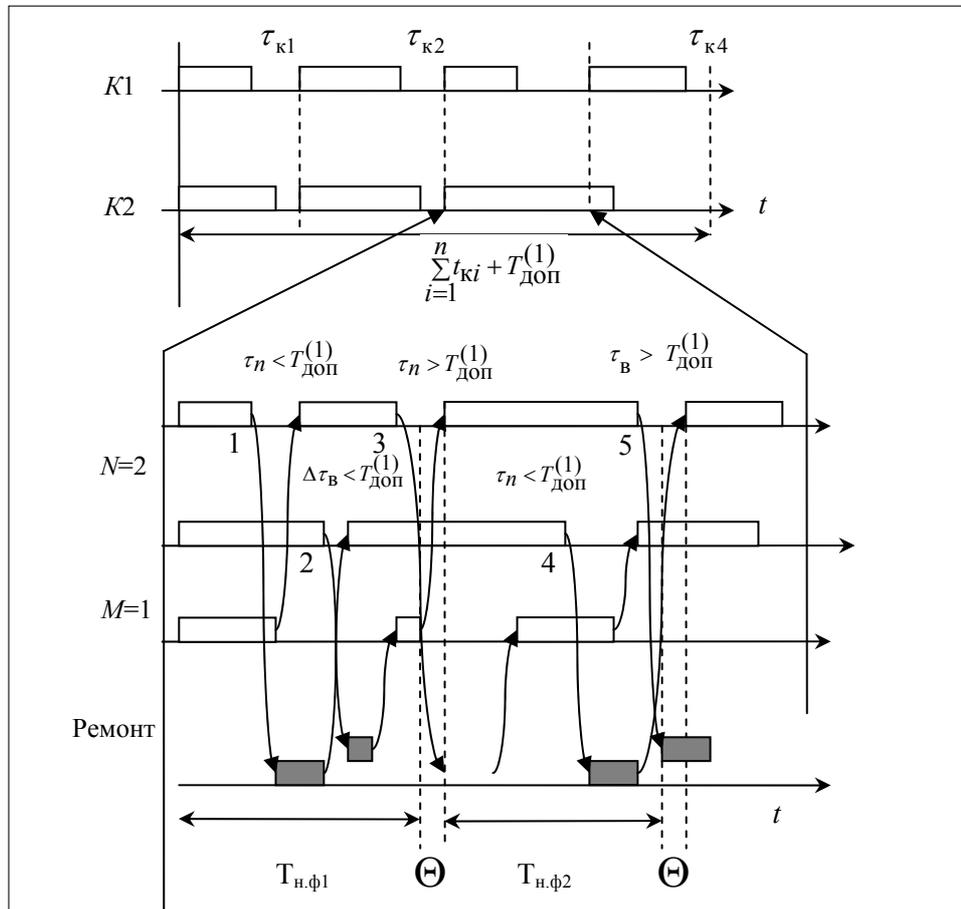


Рис. 3. Двухуровневая архитектура взаимодействия процессов передачи ММТ и поддержания режима непрерывного функционирования каналов сети

- сбоями (отказами), приводящими к срыву нормального (непрерывного) функционирования.

Рациональное введение временной избыточности ($T_{доп}^{(1)}$, $T_{доп}^{(2)}$) должно обеспечивать при этом и непрерывность функционирования в течение времени передачи τ_k или $\tau_{п.к}$ (без срывов $\tau_n \leq T_{доп}^{(1)}$ или $\Delta\tau_n \leq T_{доп}^{(1)}$) и синхронизацию ($\tau_k \leq T_{доп}^{(2)}$).

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КВАНТОВАНИЯ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА

В предположении экспоненциальных законов распределения случайных величин τ_k , $\tau_{сб}$, τ_n или $\Delta\tau_n$ для установившегося стационарного процесса функционирования ЛС можно записать формулу, выделяющую потери времени, связанные с поддержанием непрерывности

$$t_{п.к} = t_k (1 - \lambda_{ЛС} T_{п}), \quad (1)$$

где $t_{п.к}$ — интервал оставшегося времени для передачи контейнера и $t_k = T_0^k + T_{доп}^{(2)}$; $\lambda_{ЛС}$ — интенсивность локализуемых сбоев; $\lambda_{ЛС} = \lambda_{сб} - \lambda_{ср}$ ($\lambda_{сб}$, $\lambda_{ср}$ — интенсивности сбоев и срывов функционирования, соответственно); $T_{п}$ — среднее время подключения (или остаточного восстановления ΔT_B) и повтора.

Тогда для оценки вероятности своевременной передачи каждого контейнера $P_{п.к}(t_k)$ можно предложить следующую формулу [17]:

$$P_{п.к}(t_k) = 1 - \exp[-\lambda_k t_k (1 - \lambda_{ЛС} T_{п})], \quad (2)$$

где $\lambda_k = \frac{1}{T_k}$, а T_k — среднее время передачи контейнера.

С учетом $t_k = T_0^k + T_{доп}^{(2)}$ (2) примет вид

$$P_{п.к}(t_k) = 1 - \exp[-\lambda_k (T_0^k + T_{доп}^{(2)}) (1 - \lambda_{ЛС} T_{п})]. \quad (3)$$

Исходя из требования надежной передачи ММТ с минимальным числом повторов, пакет разбивается на одинаковые контейнеры с равным временем для их передачи t_{ki} ($i = \overline{1, n}$). Своевременность передачи пакета $P_{п.п}(t_{п.к})$ определяется в этом случае выражением

$$P_{п.п}(t_{п.к}) = [P_{п.к}(t_k)]^n \quad (4)$$

как вероятность своевременной передачи пакета при условии, что каждый его контейнер будет передан своевременно с учетом минимальной частоты повторов в целом.

Случайное время передачи набора контейнеров (пакета) можно оценить, используя распределение Эрланга. Представляя процесс передачи цепочкой экспоненциальных фаз (с параметром $\lambda_k = \frac{1}{T_k}$ для каждого контейнера) и числом фаз, равным числу передаваемых контейнеров — n (в этом случае параметр распределения Эрланга $k = n$), можно оценить плотность распределения случайного времени передачи пакета $f(t_{п.п})$

$$f(t_{п.п}) = \frac{(\lambda_k t_{п.п})^{n-1}}{T_k [(n-1)!]} \exp[-\lambda_k t_{п.п}]. \quad (5)$$

Тогда, соответственно, вероятность своевременной передачи пакета $P_{п.п}(t_{п.к})$ будет оцениваться выражением

$$P_{п.п}(t_{п.к}) = 1 - (\exp[-\lambda_k t_{п.п}]) \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_k t_{п.п})^i}{i!}. \quad (6)$$

Как и в предыдущем случае, необходимо учитывать потери времени на подключение (восстановление) каналов

$$t_{п.п} = t_{н.к} (1 - \lambda_{ЛС} T_{п}) = (T_0^{н.к} + T_{доп}^{(3)}) (1 - \lambda_{ЛС} T_{п}). \quad (7)$$

В этом случае учитываются сбои, приводящие к повторам/восстановлениям на всем интервале

$$t_{н.к} = T_0^{н.к} + T_{доп}^{(3)}.$$

Таким образом, заданную своевременность передачи с учетом повторов $t_{н.к} \leq T_{mp}$ можно обеспечить только уменьшением числа повторов (снижением интенсивности локальных сбоев $\lambda_{ЛС}$).

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛС

Рассмотрим требования, которые предъявляет уровень мультиплексирования (канальный уровень АТМ) к надежности функционирования уровня битового потока (физический уровень SDH). Главное требование — обеспечение верности, обусловленной искажениями, связанными с нарушением непрерывности битового потока. При этом введение аппаратурно-временной избыточности для поддержания непрерывности не должно приводить к потере требуемой своевременности передачи пакетов.

Таким образом, эффективность функционирования каждого канала ЛС определяется своевременностью передачи контейнера $P_{п.к}(t_k)$ или пакета $P_{п.п}(t_{н.к})$ при условии, что в течение передачи не произойдет срыва нормального функционирования

$$P_{эф}(t_k) = P_{п.к}(t_k) P_{н.ф}(T_{доп}^{(1)}) \quad \text{или} \quad P_{эф}(t_{н.к}) = P_{п.п}(t_{н.к}) P_{н.ф}(T_{доп}^{(1)}), \quad (8)$$

где

$$P_{н.ф}(T_{доп}^{(1)}) = \exp[-\lambda_{ср} t_k] = \exp\left[-\frac{t_k}{T_{н.ф}(T_{доп}^{(1)})}\right]$$

или

$$P_{н.ф}(T_{доп}^{(1)}) = \exp[-\lambda_{ср} t_{н.к}] = \exp\left[-\frac{t_{н.к}}{T_{н.ф}(T_{доп}^{(1)})}\right];$$

$\lambda_{ср}$, $T_{н.ф}(T_{доп}^{(1)})$ — интенсивность срывов и среднее время нормального функционирования ($\lambda_{ср} = \frac{1}{T_{н.ф}(T_{доп}^{(1)})}$).

Среднее время нормального функционирования $T_{н.ф}$, определяемое как среднее время пребывания полумарковского процесса (ПМП) в подмножестве состояний нормального функционирования E_+ до первого выхода из этого подмножества, рассмотрено в работах [7,14]. Как отмечалось выше, ЛС представлена в виде МКС, состоящей из N основных и M резервных каналов. В графе переходов нумерацию начнем с состояний нормального функционирования: полностью исправное состояние обозначим $E_1(N, M)$,

состояние с одним неисправным резервным каналом — $E_2(N, M-1)$ и так далее, соответственно последнее состояние этого подмножества $E_{M+1}(N, 0)$. В дальнейшем ограничимся рассмотрением состояний только этого подмножества.

Матрица вероятностей перехода для подмножества E_+ имеет вид

$$P^0 = \begin{pmatrix} 0 & p_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_{32} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & p_{M, M+1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{M+1, M} & 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где p_{ij} — стационарная вероятность перехода из E_i в E_j ; q_i — среднее время пребывания в состоянии E_i . В случае нагруженного резерва эти величины определяются такими формулами [7]:

$$p_{i, i+1} = \lambda_{сб}(NQ + M - i + 1)q_i, \quad i = 1 \dots M \quad \text{и} \quad p_{i, i-1} = \mu q_i, \quad i = 2 \dots M + 1, \quad (10)$$

$$q_1 = \frac{1}{\lambda_{сб}(N + M)}, \quad q_i = \frac{1}{\mu + \lambda_{сб}(N + M - i + 1)}, \quad i = 2 \dots M + 1, \quad Q = P(\Delta\tau_v > T_{доп}^{(1)}).$$

Для ЛС с ненагруженным резервом вероятности перехода и времена пребывания в определенном состоянии будут несколько отличаться:

$$p_{i, i+1} = \lambda_{сб}NQq_i, \quad i = 1 \dots M \quad \text{и} \quad p_{i, i-1} = \mu q_i, \quad i = 2 \dots M + 1,$$

$$q_1 = \frac{1}{N\lambda_{сб}}, \quad q_i = \frac{1}{\mu + \lambda_{сб}N}, \quad i = 2 \dots M + 1.$$

Следуя [7], обозначим m_i среднее время пребывания в подмножестве состояний E_+ при условии, что в начальный момент система находилась в i -м состоянии. Собирая все величины m_i в вектор \bar{m} , а величины q_i — в вектор \bar{q} , уравнение для надежностных характеристик можно записать так:

$$\bar{m} = \bar{q} + P^0 \bar{m} \quad \text{или} \quad (I - P^0) \bar{m} = \bar{q},$$

где I — единичная матрица порядка $M + 1$. Для определенности можно полагать, что система всегда начинает работать с полностью исправного состояния E_1 . Тогда $T_{н.ф} = m_1$.

С другой стороны, модифицируя модель, предложенную в работе [14], для среднего времени нормального функционирования $T_{н.ф}(T_{доп}^{(1)})$ ЛС (в виде МКС, состоящей из N основных и M резервных каналов) можно привести формулу

$$T_{н.ф}(T_{доп}^{(1)}) = \sum_{i=0}^M \frac{P_i}{\lambda_{сб i} + \mu_i} \left(\sum_{i=0}^M \frac{QN\lambda_{сб}P_i}{\lambda_{сб i} + \mu_i} + \frac{N\lambda_{сб}P_{iM}}{N\lambda_{сб} + \mu_{Mi}} \right)^{-1}, \quad (11)$$

где $\lambda_{сбi} = [N + (M - i)]\lambda_{сб}$, $\lambda_{сб}$ — интенсивность сбоя одного канала; $\mu_i = i\mu$ — интенсивность остаточного восстановления при условии, что $l \geq i$ (l — число средств восстановления);

$$Q = P(\Delta\tau_{в} > T_{доп}^{(1)}) = 1 - F_{в}(T_{доп}^{(1)}).$$

Решив систему уравнений (10) с учетом $\sum_{i=0}^{M+1} P_i = 1$ и подставив значение P_i в (11), получим оценку среднего времени нормального функционирования в зависимости от введения аппаратной (M) и временной ($T_{доп}^{(1)}$) избыточностей с учетом интенсивностей сбоев $\lambda_{сб}$ и остаточных восстановлений μ канала.

Полагая, что распределения случайных величин экспоненциальны: времена бесперебойного функционирования канала $\tau_{б.ф}$ и подключения (или восстановления с подключением $\Delta\tau_{в}$), когда $\lambda_{сб} = \frac{1}{\tau_{н.ф}}$, $\mu = \frac{1}{\Delta\tau_{в}}$ и $\lambda_{сб} \ll \mu$, зависимость (8) принимает вид [10, 14]

$$T_{н.ф}(T_{доп}^{(1)}) = \frac{\frac{M!}{N+M} C + R}{N\lambda_{сб} \left(\frac{QM!}{N+M} C + R \right)},$$

где

$$Q = 1 - F_{в}(T_{доп}^{(1)}) = 1 - \exp\left[-\frac{T_{доп}^{(1)}}{\Delta T_{в}}\right]; \quad C = \sum_{j=0}^{M-1} \frac{\rho^j}{j!} \prod_{i=0}^{M-1} [N + (M - i)], \quad (12)$$

$$R = \rho^M \prod_{i=1}^{M-1} [N + (M - i)] \quad \text{и} \quad \rho = \frac{\lambda_{сб}}{\mu}.$$

ПРИМЕР СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ВВЕДЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

Сущность системного анализа эффективности функционирования ЛС, составляющих сети ATM/SDH, заключается в оценке влияния вводимой временной избыточности во взаимозависимые процессы: мультиплексирование со своевременной передачей контейнеров на канальном уровне (уровне ATM) и поддержание надежного функционирования при наличии сбоев/отказов на физическом уровне (уровне SDH). Оптимальное распределение временной избыточности для каждого канала (с учетом оптимального разбиения пакетов на контейнеры) должно обеспечивать максимальную эффективность функционирования ЛС при известных интенсивностях потоков сбоев/отказов $\lambda_{сб}$ и восстановлений (подключений) μ .

С учетом изложенного выше рассматривается методология системного анализа на относительно простом примере (рис. 3) передачи ММТ с заданными своевременностью и надежностью для сети с двухуровневой архитектурой:

- канальный уровень с «макроанализом» $P_{п.к} = f(t_k, T_{доп}^{(1)})$ (рис. 3);
- физический уровень с «микроанализом» $T_{н.ф} = f(T_{доп}^{(1)})$ для разных значений $\lambda_{сб}$ и $\mu = \frac{1}{\Delta T_B}$ (рис. 2, б).

На рис. 4 показаны графики $T_{н.ф} = f(\lambda_{сб}, \mu, T_{доп}^{(1)})$ для МКС. Как следует из графиков, добиться высокого качества непрерывной передачи (за счет локализации отказов, вызываемых сбоями) при необходимых для определенных классов трафика АТМ допустимых перерывов $T_{доп}^{(1)}$ (например, $T_{доп}^{(1)} = 0,25$ мс для речевого трафика) можно только за счет высокой степени автоматизации процессов восстановления и подключения резерва ($\mu = 0,5$) при относительно низкой интенсивности сбоев ($\lambda_{сб} = 0,05$), если не требовать очень высокой скорости подключения ($\gamma = 5$).

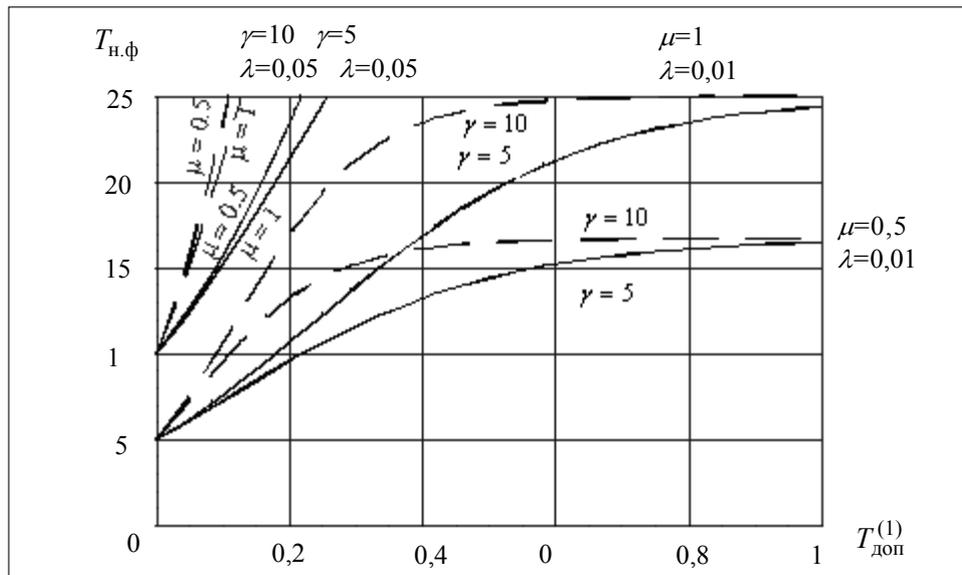


Рис. 4. График зависимости $T_{н.ф}$ от $T_{доп}^{(1)}$

На рис. 5 приведены графики $P_{эф} = f(t_k, T_{доп}^{(3)})$ для четырех вариантов квантования пакетов ($n_i, i = \overline{1,4}$) и различной относительной временной избыточности $T_{доп}^{(3)} / T_0^{нк}$.

По графикам можно определить эффективность функционирования $P_{эф} = f(t_k)$ как вероятность непрерывного (без срывов) мультиплексирования с заданной своевременностью. Обеспечение требуемой $P_{эф} \geq 0,95$ при

относительной временной избыточности $T_{\text{доп}}^{(2)}/T_0^k < 0,2$ [4] возможно только при больших значениях интервалов, свободных от срывов нормального функционирования ($T_{\text{н.ф}} \geq 90000$ с, см. рис. 2) и квантовании ($n = 4$), обеспечивающем $\tau_k \leq T_0^k + T_{\text{доп}}^{(2)} = 0,5$. Однако, если учесть, что при квантовании увеличивается объем служебных данных при $n > 4$ и, как правило, эффективность падает, то остается только одно — увеличивать интервал, свободный от срывов, путем введения так называемых «самозалечивающихся» сетей [20, 21].

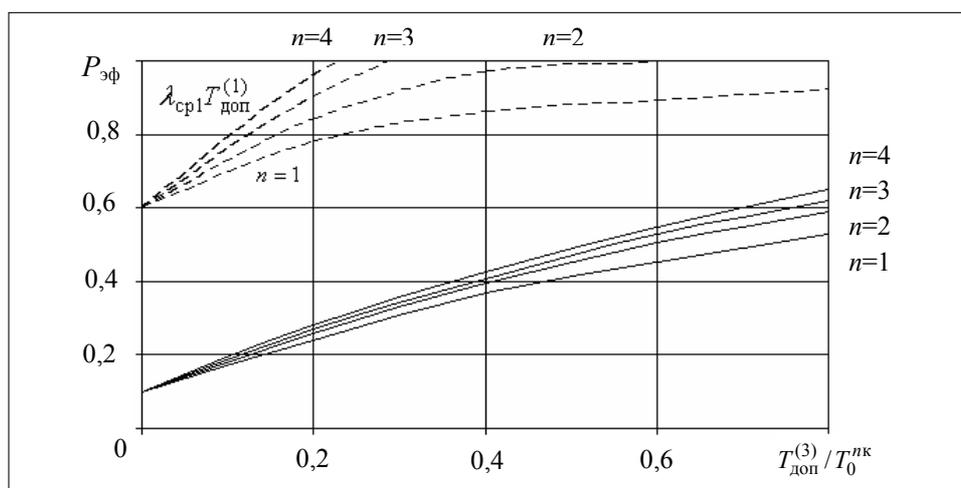


Рис. 5. График зависимости $P_{\text{эф}}(T_{\text{доп}}^{(2)}, T_{\text{доп}}^{(1)}) = f(T_k, T_{\text{доп}}^{(2)}, n, \lambda_{\text{ср}}, \mu, T_{\text{доп}}^{(1)})$ для ВП при $\lambda_{\text{ср1}} T_{\text{доп}}^{(1)} = 0,02$ и $\lambda_{\text{ср2}} T_{\text{доп}}^{(1)} = 0,04$

ВЫВОДЫ

Предложенная методология системного анализа эффективности функционирования линий связи сетей последнего поколения (технология ATM/SDH) может быть положена в основу создания программных средств инструментально-технологического проектирования, где многоуровневое комбинирование имитационных и аналитических моделей обеспечит итеративный процесс количественного оценивания функционирования с приемлемой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Research Networking. The GEANT Network* // — 2003 — www.cordis.org.
2. Ластовченко М.М., Биляк В.И., Русецкий В.Е. Системный анализ сетевых технологий создания региональных интеллектуальных сетей как базиса широкополосной первичной связи // Математические машины и системы. — 2004. — № 3. — С. 144–155.
3. Назаров А.Н., Симонов М.В. ATM: Технология высокоскоростных сетей. — М.: Экотрендз. — 1997. — 235 с.
4. Sexton M., Reid A. *Broadband Networking: ATM, SDH and SONET*. — Boston, London: Artech House, 1997. — 591 p.

5. Столингс В. Современные компьютерные сети. — М.: Питер, 2003. — 762 с.
6. Корнилов Д. Проектирование и построение сетей видеоконференцсвязи // Мобильные телекоммуникации. — 2004. — № 2. — С. 67–72.
7. Ластовченко М.М., Витвицкий А.Н. Системный анализ в аддитивном управлении надежностью передачи мультимедийного трафика // Проблемы управления и информатики. — 2004. — № 6. — С. 86–95.
8. Ежов И.И., Ластовченко М.М. О влиянии длительности восстановления на характеристики надежности функционирования сложных систем // Надежность и эксплуатация РЭА. — 1964. — № 1. — С. 59–67.
9. Ластовченко М.М., Креденцер Б.П., Сидоров Л.А. Оценка надежности радиоэлектронных систем при конечном времени подключения резерва // Надежность и эксплуатация РЭА. — 1965. — № 2. — С. 23–37.
10. Павлюк В.С., Биляк В.И. Анализатор управления реконфигурацией для сетей SDH // УСИМ. — 2000. — № 5/6. — С. 122–127.
11. Xie A., Bearel P. Accelerating Markovian analysis of asynchronous systems using state compression // IEEE Transactions on Computer Aided Design. — 1999. — № 7. — P. 18–29.
12. Ластовченко М.М., Медных В.В., Раишнык Т.Н. Системный анализ эффективности интегрального управления интеллектуальными сетями с асинхронным методом передачи информации // УСИМ. — 2000. — № 5/6. — С. 113–121.
13. Креденцер Б.П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью. — Киев: Наук. думка, 1978. — 238 с.
14. Ластовченко М.М., Лесневский Ю.Г., Синявская А.М. Разработка моделей анализа надежности функционирования интегрируемых систем передачи и обработки. — М.: Техника средств связи, 1980. — С. 70–82.
15. Шпак В.Д., Стойкова Л.С. О надежности дублированной системы с временным резервированием при полной или неполной информации об исходных данных // Кибернетика. — 1983. — № 6. — С. 89–95.
16. Коваленко И.Н. Исследования по анализу надежности сложных систем. — Киев: Наук. думка, 1976. — 210 с.
17. Коваленко И.Н., Стойкова Л.С. О производительности системы и времени решения задачи при случайных отказах и периодическом запоминании результатов // Кибернетика. — 1994. — № 5. — С. 25–34.
18. Ластовченко М.М., Ярошенко В.Н., Биляк В.И. Математические аспекты проектирования интеллектуальных коммуникационных систем передачи мультимедийных трафиков // Математические машины и системы. — 2004. — № 1. — С. 39–51.
19. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети // М.: Экотрендз, 1999. — 150 с.
20. Нетес В.А. Основные принципы организации самозалечивающихся сетей на основе SDH // Электросвязь. — 1995. — № 12. — С. 9–11.
21. Ластовченко М.М. Исследование режимов группового обновления в самовосстанавливающихся информационных системах // Техника средств связи. — 1980. — № 1. — С. 110–117.

Поступила 29.07.2005