

УДК 683.519

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ С ТЕХНОЛОГИЕЙ АТМ

Е.Ю. ЗАЙЧЕНКО

Сформулирована задача анализа показателей живучести сетей АТМ для категорий сервиса *VBR* и *ABR* в условиях отказов элементов. Введены показатели оценки живучести для указанных категорий и предложен метод их оценки и анализа. Проведены экспериментальные исследования этого метода для сети АТМ конкретной топологии при варьировании надёжностных характеристик каналов и узлов.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важных задач при проектировании компьютерных сетей — анализ показателей живучести сетей и обеспечение требуемого уровня живучести. Под живучестью сети [1] будем понимать ее способность выполнять свои функции при отказах элементов (каналов и узлов). Показатель живучести сетей оценим величиной максимального (внешнего) потока, который еще может передаваться в сети при отказах ее элементов и допустимом ухудшении качества функционирования.

В работах [2, 3] рассмотрена задача анализа обычных сетей и в качестве показателя живучести предложена величина $P\{H_{\Sigma}^{\Phi} \geq H_{\text{зад}}^k\}$, где H_{Σ}^{Φ} — величина максимального потока, который передается в сети при отказах; $H_{\text{зад}}^k = k\%H_{\Sigma}^0$, где H_{Σ}^0 соответствует максимальному потоку в безотказном состоянии сети.

Как известно, особенностью сетей с технологией АТМ является наличие разнообразных категорий сервиса (трафика) — аудиоинформации, видеоинформации, сжатых видео- и аудиоданных.

Другая важная особенность — наличие соответствующих показателей качества (Quality of Service), используемых при оценке передачи по каналу связи разных категорий трафика.

- *CTD* (cell transfer delay) — задержка передачи ячеек.
- *CDV* (cell delay variance) — вариация величины задержки.
- *CLR* (cell loss ratio) — вероятность потери ячеек, %.

Поэтому при оценке живучести сетей с технологией АТМ необходимо учитывать как разнородные виды трафика и различные категории сервиса, так и разнообразные показатели качества Q_0S .

В работе [4] рассмотрена проблема анализа показателей живучести для категории сервиса *CBR* (constant bit rate) — передача с постоянной скоростью аудио- и видеoinформации.

Цель настоящей статьи — рассмотрение проблемы показателей живучести сети АТМ для категорий сервиса: *VBR* — передача с переменной скоростью сжатых аудио- и видеоданных и *ABR* — передача с доступной скоростью данных, а также описание математического аппарата (алгоритмов) для оценки этих показателей и обеспечения требуемого уровня живучести сети АТМ.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЖИВУЧЕСТИ СЕТЕЙ

Заданы: структура сети АТМ $G = (X, E)$, $X = \{x_j\}_{j=1, n}$ — множество узлов сети, $E = \{(r, s)\}$ — множество каналов связи сети, величины пропускных способностей КС $\mu_{rs} = n_{rs}\mu$, где μ — пропускная способность базового канала (64 Кбит/с), а также матрицы требований $H_{VBR} = \|h_{ij}^{VBR}\|_{i, j=1, n}$ и $H_{ABR} = \|h_{ij}^{ABR}\|_{i, j=1, n}$. Пусть $H_{\Sigma VBR}^0$ и $H_{\Sigma ABR}^0$ — общая величина потока трафиков соответственно *VBR* и *ABR* в полностью безотказовом состоянии при заданных ограничениях на показатели качества Q_0S .

$$T_{\text{cp}}^{VBR} = CTD_{VBR} \leq T_{VBR \text{ зад}}, \tag{1}$$

$$CLR_{VBR} \leq P_{VBR \text{ зад}}, \tag{2}$$

$$T_{\text{cp}}^{ABR} = CTD_{ABR} \leq T_{ABR \text{ зад}}, \tag{3}$$

где величина *CTD* и *CLR* для трафиков категорий *VBR* и *ABR* задается следующими выражениями:

$$T_{\text{cp}}^{VBR} = \frac{1}{H_{\Sigma}^{(1)}} \sum_{(r,s) \in E} \frac{f_{rs}^{(1)}(f_{rs}^{(1)} + f_{rs}^{(2)})}{\mu_{rs}(\mu_{rs} - f_{rs}^{(1)})}, \tag{4}$$

$$T_{\text{cp}}^{ABR} = \frac{1}{H_{\Sigma}^{(2)}} \sum_{(r,s) \in E} \frac{f_{rs}^{(2)}(f_{rs}^{(1)} + f_{rs}^{(2)})}{(\mu_{rs} - f_{rs}^{(1)})(\mu_{rs} - f_{rs}^{(1)} - f_{rs}^{(2)})}, \tag{5}$$

$$CLR_{VBR} = P_0 \left(\frac{f_{rs}^{VBR}}{\mu_{rs}} \right)^{n_{rs}} \frac{1}{n_{rs}!} \left(\frac{f_{rs}^{VBR}}{n_{rs}\mu} \right)^N, \tag{6}$$

где μ_{rs} — общая пропускная способность (ПС) каналов связи (КС), выделенных под трафики VBR и ABR ; n_{rs} — число базовых каналов трафика VBR ; P_0 — нормирующий множитель; $f_{rs}^{(1)}$ — поток трафика VBR в канале (r,s) ; $f_{rs}^{(2)}$ — поток трафика ABR в КС (r,s) .

Предположим, что КС и узлы связи (УС) являются ненадежными и подвержены отказам, причем известны коэффициенты готовности КС (r,s) — $k_{\Gamma rs}$ и узлов — $k_{\Gamma i}$.

Тогда вероятность отказа КС (r_i, s_i) при условии, что все вероятности состояния компонент сети ATM статистически независимые

$$P_{\text{отказ } r_i s_i} = (1 - k_{\Gamma r_i s_i}) \prod_{\forall (r,s) \neq (r_i, s_i)} k_{\Gamma rs} \prod_{i=1}^n k_{\Gamma i}. \quad (7)$$

Вероятность отказа узла x_i $P_{\text{отказ}, i}$ задается аналогичным выражением.

Оценим живучесть сети ATM комплексным (векторным) показателем — величиной максимального потока трафиков CBR — H_{Σ}^{CBR} ; VBR — H_{Σ}^{VBR} ; ABR — H_{Σ}^{ABR} , который можно ещё передать при отказах её элементов, когда несколько снижены значения ограничений на $Q_0 S$.

Так как для трафика CBR в любом КС выделяется фиксированная полоса (часть общей ПС), то для него можно ввести такой показатель живучести [4].

$$P(H_{\Sigma}^{\Phi CBR} \geq k\% H_{\Sigma}^{(0) CBR}) \quad (8)$$

при условиях (ограничениях)

$$\overline{CLR}(M, F_{CBR}) \leq CLR_{CBR, \text{зад}}, \quad (9)$$

$$\overline{T}_{CBR} \leq T_{CBR, \text{зад}}, \quad (10)$$

где $H_{\Sigma}^{\Phi CBR}$ — величина фактического потока трафика CBR . Это можно передать при отказах сети для выполнения ограничений на $Q_0 S$ вида (9) и (10), причем заданные значения показателей $Q_0 S$ — величины $CLR_{CBR, \text{зад}}$ и $T_{CBR, \text{зад}}$ могут быть несколько увеличены по сравнению с нормальным функционированием сети.

Для трафиков VBR и ABR при оценке живучести необходимо учитывать, что они используют общую часть полосы во всех каналах, причем сначала занимает полосу трафик VBR , как более приоритетный, а потом оставшуюся часть полосы — трафик ABR .

Поэтому для них целесообразно ввести согласованные общие показатели живучести, такие как

$$P\left\{H_{VBR}^{\Phi} \geq k\% H_{VBR \Sigma}^{(0)}\right\}, \quad (11)$$

где $k\% = 50 \dots 100\%$
при условиях

$$\overline{CLR}_{VBR}(F_{VBR}, M) \leq CLR_{VBR \text{ зад}}, \quad (12)$$

$$\overline{T}_{VBR} \leq T_{VBR \text{ зад}}, \quad (13)$$

а также

$$P\{H_{ABR}^\Phi \geq k\%H_{ABR}^{(0)}\} \quad (14)$$

при условии, что

$$\overline{T}_{ABR} \leq T_{ABR}^{\text{зад}}. \quad (15)$$

2. МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ СЕТЕЙ АТМ ДЛЯ ТРАФИКОВ VBR И ABR

Рассмотрим различные состояния z_1, z_2, \dots, z_k , которые отвечают отказам (отказ 1 КС, отказ 1 УС, отказ 1 КС+1 УС, отказ 2 КС и отказ 3 КС).

Для любого из состояний z_i решим вспомогательную задачу нахождения максимального потока $H_{ABR}(z_k)$ при условии

$$H_{VBR}^\Phi(z_i) \geq k\%H_{\Sigma VBR}^{(0)} \quad (16)$$

и ограничениях

$$\overline{CLR}_{VBR}(F^{(1)}, F^{(2)}) \leq CLR_{VBR \text{ зад}}, \quad (17)$$

$$\overline{T}_{VBR}(F^{(1)}, F^{(2)}) \leq T_{\text{зад} VBR}. \quad (18)$$

При этом используем специальный алгоритм нахождения максимального потока (НМП) для смеси потоков $VBR + ABR$.

Сначала решим задачу НМП только для потока VBR

$$\max H_{\Sigma VBR}^\Phi$$

при ограничениях (17) и (18).

Предположим, что

$$k_i H_{\Sigma}^{(0)} \leq H_{\Sigma VBR}^\Phi < k_{i-1} \% H_{\Sigma VBR},$$

где $k_0 = 100\%$, $k_1 = 90\%$, $k_2 = 80\%$, $k_3 = 70\%$, $k_4 = 60\%$, $k_5 = 50\%$.

Тогда, зафиксировав поток VBR на уровне $H_{\Sigma VBR}^\Phi = k_{i-1} \% H_{\Sigma VBR}^{(0)}$ и определив соответствующее распределение потоков VBR $F^{(1)}(\bar{k}) =$

$= [f_{rs}^{VBR}(k)](r,s) \in E$, находим такое распределение для трафика ABR $F^{(2)} = [f_{rs}^{ABR}]$ на резерве ПС, при котором обеспечивается

$$\max H_{\Sigma ABR}^{\Phi}(F^{(2)} / F^{(1)})$$

и выполняются такие ограничения:

$$\overline{CLR}_{VBR}(F_2 / F_1) \leq CLR_{зад VBR},$$

$$\overline{T}_{VBR}(F_2 / F_1) \leq T_{зад VBR}, \quad T_{ABR}(F_2 / F_1) \leq \overline{T}_{зад ABR}.$$

Зафиксируем найденное решение и обозначим его $H_{\Sigma VBR}^{\Phi}, H_{\Sigma ABR}^{\Phi}(z_i)$.

Определим

$$P(H_{\Sigma VBR}^{\Phi} \geq k\% H_{\Sigma VBR}^{(0)}) = \sum_{\forall z_i: H^{\Phi}(z_i) \geq k\% H_{\Sigma VBR}} p(z_i). \quad (19)$$

Далее найдем

$$P(H_{\Sigma ABR}^{\Phi} \geq k\% H_{\Sigma ABR}^{(0)}) = \sum_{z_i: H_{ABR}^{\Phi}(z_i) > k\% H_{\Sigma ABR}} p(z_i). \quad (20)$$

Изменяя $k\%$ в интервале 50...100% и используя формулы (19) и (20), получаем функцию живучести сети для трафиков VBR и ABR .

При вычислении показателей живучести сети АТМ многократно используется алгоритм нахождения максимального потока смеси трафиков VBR и ABR .

3. ЗАДАЧА НАХОЖДЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ПОТОКА ДЛЯ СМЕСИ ТРАФИКОВ VBR И ABR В СЕТЯХ АТМ

Постановка задачи. Рассмотрим задачу нахождения МП для смеси потоков VBR и ABR .

Заданы: структура сети АТМ $G = (X, E)$; $X = \{x_j\}$, $j = \overline{1, n}$ – множество узлов, $E = \{(r, s)\}$ – множество каналов связи, ПС всех каналов $\mu_{rs} = n_{rs} \mu$, а также матрицы требований для трафика VBR $H_{VBR} = \|h_{ij}^{(1)}\|$ и ABR $H_{ABR} = \|h_{ij}^{(2)}\|$, $i, j = \overline{1, n}$.

Предположим, что отказал КС (r_k, s_k) , пусть этому случаю отвечает состояние системы z_k .

Нужно найти такое распределение потоков в сети для категории VBR : $F_1 = [f_{rs}^{(1)}]_{(r,s) \in E}$, для категории ABR : $F_2 = [f_{rs}^{(2)}]_{(r,s) \in E}$, при котором максимизируется величина суммарного внешнего потока

$$H_{\Sigma}^k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}^{(k)} \rightarrow \max_{(F_1, F_2)} \quad (21)$$

при условиях

$$CLR_{VBR}(F_1) \leq CLR_{VBR \text{ зад}}, \quad (22)$$

$$CTD_{VBR} = \bar{T}_{VBR}(F_1) \leq T_{VBR \text{ зад}}, \quad (23)$$

$$\bar{T}_{ABR}(F_1) \leq T_{ABR \text{ зад}}, \quad (24)$$

где

$$h_{ij}^{(k)} = h_{ij}^{VBR} + h_{ij}^{ABR}, \quad (25)$$

$$H_{\Sigma}^{VBR} = k_1 \% H_{\Sigma}^{(k)}; \quad H_{\Sigma}^{ABR} = k_2 \% H_{\Sigma}^{(k)} = (1 - k_1) \% H_{\Sigma}^{(k)}. \quad (26)$$

Задача (21)–(25) — сложная. Она обобщает предыдущую задачу и состоит из двух подзадач: нахождение максимального потока для трафика *VBR* при ограничениях (22), (23) и нахождение максимального потока *ABR* при ограничениях (23), (24).

Поскольку до решения главной задачи (21) неизвестна величина $\max H_{\Sigma}^{(k)}$, то невозможно определить H_{Σ}^{VBR} и H_{Σ}^{ABR} и обеспечить выполнение соотношения между потоками $H_{\Sigma}^{VBR} : H_{\Sigma}^{ABR} = k_1 : k_2$.

Поэтому для упрощения этой задачи примем, что в любом КС (r, s) общая ПС μ_{rs} распределяется на полосу для трафика *VBR* μ_{rs}^{VBR} и трафика *ABR* μ_{rs}^{ABR} в таком же отношении.

$$\mu_{rs}^{VBR} : \mu_{rs}^{ABR} = k_1 : k_2 = k_1 : (1 - k_1).$$

Тогда от исходной задачи (21)–(24) перейдем к следующей комбинации задач.

1. Найти такое распределение потоков в сети АТМ для трафика *VBR* F^* , при котором максимизируется величина суммарного внешнего потока *VBR* при ограничениях на показатели качества *CLR* и *CTD*.

Найти

$$H_{\Sigma}^{VBR} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}^{VBR} \rightarrow \max \quad (27)$$

при ограничениях

$$CLR_{VBR}(F_1) \leq CLR_{\text{зад}}, \quad (28)$$

$$T_{VBR}(F_1) \leq T_{VBR \text{ зад}}, \quad (29)$$

$$f_{rs}^{(1)} \leq \mu_{rs}^{VBR} = k_1 \mu_{rs}, \quad (30)$$

$$h_{ij}^{VBR} \leq h_{ij \text{ зад}}; \quad i, j = \overline{1, n}.$$

2. При заданном распределении потока VBR F_1 найти такое распределение потока ABR F_2 , при котором максимизируется его величина.

$$H_{\Sigma}^{ABR} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}^{ABR} \rightarrow \max \quad (31)$$

при ограничениях

$$CLR_{VBR}(F_2 / F_1) \leq CLR_{\text{зад}}, \quad (32)$$

$$T_{VBR}(F_2 / F_1) \leq T_{VBR \text{ зад}}, \quad (33)$$

$$\bar{T}_{ABR}(F_2 / F_1) \leq T_{ABR \text{ зад}}, \quad (34)$$

$$f_{rs}^{(2)} \leq \mu_{rs}^{ABR} = k_2 \mu_{rs} = (1 - k_1) \mu_{rs}, \quad (r, s) \in E. \quad (35)$$

Т.е. содержание задачи 2 состоит в таком распределении менее приоритетного потока категории ABR, при котором не нарушаются установленные ранее ограничения на Q_0S для категории VBR, выполняются ограничения на CTD для трафика ABR, а суммарная величина входного потока ABR максимальна. При этом поток ABR F_2 использует часть $k_2 = 1 - k_1$ от общей ПС каждого канала.

4. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ ДЛЯ ТРАФИКОВ КАТЕГОРИЙ VBR И ABR

Итак, пусть задана сеть ATM, которая описывается графом $G = (X, E)$, известны ПС всех каналов $\{\mu_{rs}\}$, а также матрицы требований $H_{VBR} = \|h_{ij}^{VBR}\|$, $H_{ABR} = \|h_{ij}^{ABR}\|$.

1. Вычислим величины потоков VBR и ABR в безотказном состоянии z_0 : $H_{\Sigma VBR}^{(0)}$, $H_{\Sigma ABR}^{(0)}$.

2. Рассмотрим разные отказовые состояния системы: z_1, z_2, \dots, z_k . Для любого из состояний z_k находим вероятность его появления $P(z_k)$.

В частности, если z_k — отказ канала (r_k, s_k) , а все другие элементы в безотказном состоянии, то вероятность состояния z_k

$$P(z_k) = (1 - k_{\Gamma r_k s_k}) \prod_{\forall (r,s) \neq (r_k, s_k)} k_{\Gamma rs} \prod_{i=1}^n k_{\Gamma i}, \quad (36)$$

где $k_{\Gamma rs}$ — коэффициент готовности КС (r, s) ; $k_{\Gamma i}$ — коэффициент готовности i -го узла (x_i) .

3. Найдем величину максимального потока в состоянии z_k $H_{\Sigma}(z_k)$ при ограничениях

$$T_{\text{ср}}^{VBR} \leq T_{\text{зад}}^{VBR}; \quad T_{\text{ср}}^{ABR} \leq T_{\text{зад}}^{ABR}; \quad \overline{CLR}^{VBR} \leq CLR_{\text{зад}},$$

$$H_{\Sigma}(z_k) = H^{VBR}(z_k) + H^{ABR}(z_k).$$

4. Оценим показатели живучести (ПЖ) для данной сети в условиях действия отказов элементов для категорий VBR и ABR .

$$P\{H_{\Sigma}^{\Phi VBR} \geq H_{\text{зад}}^k\} = \sum_{z_k: H^{VBR}(z_k) \geq H_{\text{зад}}^k} P(z_k) = 1 - \sum_{z_j: H^{VBR}(z_j) < H_{\text{зад}}^k} P(z_j), \quad (37)$$

$$P\{H_{\Sigma}^{\Phi ABR} \geq H_{\text{зад}}^k\} = \sum_{z_k: H^{ABR}(z_k) \geq H_{\text{зад}}^k} P(z_k), \quad (38)$$

$$H_{\text{зад}}^k = k\% H_{\Sigma}^{(0)}; \quad k \in \{50, 60, \dots, 100\}.$$

5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ СЕТЕЙ АТМ

Используем введенные показатели живучести для оптимизации сетей АТМ по заданным значениям показателей живучести.

Постановка задачи. Заданы архитектура сети АТМ, описываемая графом $G = (X, E)$, матрицы требований трафиков категории VBR :

$$H_{VBR} = \|h_{ij}^{VBR}\| \text{ и категории } ABR: H_{ABR} = \|h_{ij}^{ABR}\|, \text{ каналы КС } (r, s).$$

Введены ограничения на показатели $Q_0 S$ для трафика VBR : $CTD_{VBR \text{ зад}}$, $CLR_{VBR \text{ зад}}$ и для трафика ABR : $CTD = T_{ABR \text{ зад}}$.

Введены функции стоимости КС $C^{\text{пер}}(l_{rs}, \mu_{rs})$ в зависимости от длины l_{rs} и пропускной способности μ_{rs} .

Пусть, как и ранее, каналы и узлы сети ненадежны, и заданы коэффициенты готовности КС $K_{\Gamma rs}$ и узлов $K_{\Gamma i}$.

Требуется синтезировать такую структуру сети, при которой обеспечивались бы заданные значения показателей живучести для трафиков VBR и ABR.

$$P(H_{\Sigma VBR}^{\phi} \geq a_k H_{\Sigma VBR}^{(0)}) \geq P_{k \text{ зад}}^{VBR}, \quad k = \overline{1,5}, \quad (39)$$

$$P(H_{\Sigma ABR}^{\phi} \geq a_k H_{\Sigma ABR}^{(0)}) \geq P_{k \text{ зад}}^{ABR}, \quad (40)$$

причем дополнительные затраты на обеспечение требуемого уровня живучести были бы минимальными, где $P_{k \text{ зад}}^{VBR}$ и $P_{k \text{ зад}}^{ABR}$ — требуемые значения показателей соответственно для категорий VBR и ABR, $a_1 = 50\%$; $a_2 = 80\%$; $a_3 = 70\%$; $a_4 = 60\%$; $a_5 = 50\%$.

Для того чтобы обеспечить заданные значения показателей (39), (40), необходимо резервировать соответствующие КС и УС. При этом дополнительные затраты средств на резервирование должны быть минимальными.

Для решения сформулированной задачи предлагается следующий алгоритм.

Моделируем различные отказовые состояния: $z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_k$.

Для каждого из них вычисляем вероятность $p(z_i)$, а также находим величину максимального потока $H_{\Sigma}^{VBR}(z_k)$ и $H_{\Sigma}^{ABR}(z_k)$.

Разбиваем все множество отказовых состояний на подмножества

- а) $Z_1 = \{z_j\}$ такое, что $H_{\Sigma}(z_j) < 90\% H_{\Sigma}^{(0)}$, если $z_j \in Z_1$;
- б) $Z_2 = \{z_i\}$ такое, что $H_{\Sigma}(z_i) < 80\% H_{\Sigma}^{(0)}$, если $z_i \in Z_2$;
- в) $Z_3 = \{z_k\}$ такое, что $H_{\Sigma}(z_k) < 70\% H_{\Sigma}^{(0)}$, если $z_k \in Z_3$;
- г) $Z_4 = \{z_r\}$ такое, что $H_{\Sigma}(z_r) < 60\% H_{\Sigma}^{(0)}$, если $z_r \in Z_4$;
- д) $Z_5 = \{z_t\}$ такое, что $H_{\Sigma}(z_t) < 50\% H_{\Sigma}^{(0)}$, если $z_t \in Z_5$.

Очевидно, между указанными множествами выполняется следующее отношение включения: $Z_5 \subset Z_4 \subset Z_3 \subset Z_2 \subset Z_1$.

Увеличение живучести сети обеспечиваем путем резервирования каналов связи. В первую очередь необходимо резервировать те из них, отказы которых приводят к наибольшей деградации общей пропускной способности сети, т.е. те, которым соответствуют отказовые состояния $z_k \in Z_5$. Назовём это множество отказовых состояний критическим.

Для оценки эффективности резервирования КС (r_k, s_k) , отказ которого определяет состояние z_j , введем показатель

$$\alpha_{r_k s_k} = -\frac{\Delta P(z_j)}{\Delta C_{r_k s_k}}, \quad (41)$$

где $\Delta P(z_j)$ — изменение вероятности состояния z_k при резервировании КС (r_k, s_k) ; $\Delta C_{r_k s_k}$ — стоимость такого резервирования.

Можно показать, что

$$\Delta P(z_j) = -K_{\Gamma r_k s_k} P(z_j). \quad (42)$$

Алгоритм обеспечения заданного уровня живучести сети АТМ.

1. Проранжируем каналы связи (r_k, s_k) по убыванию величин $\alpha_{r,s}$.
2. Выберем КС (r^*, s^*) такой, что $\alpha_{r^*, s^*} = \max \alpha_{r,s}$.
3. Введем резервирование КС (r^*, s^*) и пересчитаем фактические показатели живучести после резервирования.

$$P_k^{(n)}(H_{\Sigma}^{\phi} \geq a_k H_{\Sigma}^{(0)}) = P(H_{\Sigma}^{\phi} \geq a_k H_{\Sigma}^{(0)}) + |\Delta P(z_j)|.$$

Проверим выполнение условий.

$$P^{(n)}(H_{\Sigma}^{\phi} \geq a_k H_{\Sigma}^{(0)}) \geq P_{k \text{ зад}}, \quad k = \overline{1, 5}. \quad (43)$$

Если условие (43) выполняется для всех k , то стоп, конец работы алгоритма, иначе переход на шаг 2 следующей итерации. Последовательность шагов 2,3 повторяем до тех пор, пока в результате не обеспечим выполнение условия (43) для всех $k = \overline{1, 5}$.

Таким образом обеспечивается заданный уровень показателей живучести сети АТМ при минимальных дополнительных затратах.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ СЕТЕЙ АТМ

Для исследования предложенных алгоритмов оценки показателей живучести сетей АТМ использован программный комплекс АТМ «Net Builder». Структура моделируемой сети показана на рис.1.

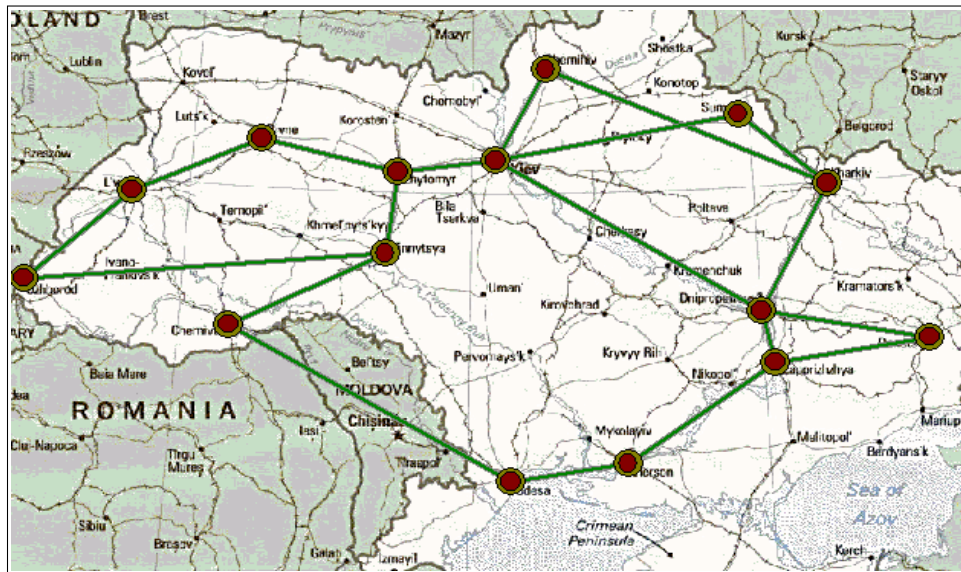


Рис. 1. Структура глобальной сети АТМ

Были заданы матрицы требований (входных потоков) для трафиков типа $VBR-H_{VBR}$ и $ABR-H_{ABR}$, а также показатели надежности каналов и узлов.

Коэффициенты готовности для каналов связи вычислены с помощью нормального распределения в диапазонах $0,85...0,9$ и $0,9...0,95$.

Пропускная способность базового канала выбрана 1550 Кб/с.

Ограничения для трафика ABR : $T_{зад} = 1$. Ограничения для трафика VBR : $T_{зад} = 0,5$; $CLR_{зад} = 0,1$. Ограничения для трафика CBR : $T_{зад} = 0,15$; $CLR_{зад} = 0,01$.

Таблица 1. Учитываемые отказовые состояния

Количество каналов	Количество узлов	Вычисляемая доля
1	0	1
0	1	1
1	1	0,2
2	0	0,3
0	2	0,1

Целью эксперимента был анализ того, насколько изменения требований качества CTD и CLR влияют на значения функции живучести сети, а также на показатели живучести для трафиков VBR и ABR . При этом варьировались показатели качества CLR_{VBR} , T_{VBR} , T_{ABR} и

коэффициенты готовности каналов и узлов (табл. 2–5).

Таблица 2. Показатели живучести при коэффициентах готовности узлов $0,9...0,95$ и каналов $0,85...0,9$

Условия эксперимента VBR/ABR		$CTD_{VBR}=0,5$	$CTD_{VBR}=1,0$	$CTD_{VBR}=1,5$	$CTD_{VBR}=1,5$	$CTD_{VBR}=2,0$
		$CLR_{VBR}=0,1$	$CLR_{VBR}=0,1$	$CLR_{VBR}=0,5$	$CLR_{VBR}=1,0$	$CLR_{VBR}=1,0$
		$CTD_{ABR}=1,0$	$CTD_{ABR}=1,5$	$CTD_{ABR}=2,0$	$CTD_{ABR}=2,0$	$CTD_{ABR}=3,0$
Макс. поток $H_0, \%$	VBR	41348	41348	41348	41348	41348
	ABR	20508	20508	20508	20508	20508
50	VBR	0,10001155	0,11452262	0,10751431	0,11903488	0,10219725
	ABR	0,05793786	0,08428825	0,07999864	0,08915338	0,07531400
60	VBR	0,10001155	0,11452262	0,10751431	0,11903488	0,10219725
	ABR	0,04849326	0,07260846	0,07034516	0,07861667	0,06283555
70	VBR	0,08390295	0,09475762	0,08914484	0,10043880	0,08582897
	ABR	0,04740503	0,05607886	0,05528679	0,06062737	0,04940831
80	VBR	0,07894509	0,08966796	0,08442162	0,09431055	0,08080367
	ABR	0,04458841	0,05253079	0,05246718	0,05724420	0,04667396
90	VBR	0,07572227	0,08599551	0,08121628	0,09100518	0,07730416
	ABR	0,02469546	0,02911419	0,02804557	0,03054376	0,02670705
100	VBR	0,05975466	0,06946591	0,06615790	0,07301588	0,06387692
	ABR	0,01474850	0,01863829	0,01712098	0,01919746	0,01624107

Таблица 3. Показатели живучести при коэффициентах готовности узлов 0, 95...0, 99 и каналов 0, 85...0, 9

Условия эксперимента <i>VBR/ABR</i>		$CTD_{VBR}=0,5$	$CTD_{VBR}=1,0$	$CTD_{VBR}=1,5$	$CTD_{VBR}=1,5$	$CTD_{VBR}=2,0$
		$CLR_{VBR}=0,1$	$CLR_{VBR}=0,1$	$CLR_{VBR}=0,5$	$CLR_{VBR}=1,0$	$CLR_{VBR}=1,0$
		$CTD_{ABR}=1,0$	$CTD_{ABR}=1,5$	$CTD_{ABR}=2,0$	$CTD_{ABR}=2,0$	$CTD_{ABR}=3,0$
Макс. поток $H_0, \%$	<i>VBR</i>	41348	41348	41348	41348	41348
	<i>ABR</i>	20508	20508	20508	20508	20508
50	<i>VBR</i>	0,19563414	0,21547921	0,20900078	0,22738136	0,24313888
	<i>ABR</i>	0,11761720	0,16024656	0,15923434	0,17667056	0,18546175
60	<i>VBR</i>	0,19563414	0,21547921	0,20900078	0,22738136	0,24313888
	<i>ABR</i>	0,10312587	0,138115568	0,13718136	0,16009535	0,16206237
70	<i>VBR</i>	0,16823669	0,18544541	0,18154414	0,19848764	0,20941251
	<i>ABR</i>	0,09972787	0,10445118	0,10957252	0,12418081	0,12649346
80	<i>VBR</i>	0,15855774	0,17437280	0,17137868	0,18943670	0,19865003
	<i>ABR</i>	0,09351924	0,09892005	0,10270197	0,11694418	0,11921770
90	<i>VBR</i>	0,15283407	0,16760537	0,16499661	0,18446605	0,19036307
	<i>ABR</i>	0,05281535	0,05780005	0,05675303	0,05962997	0,06801493
100	<i>VBR</i>	0,12337456	0,13390087	0,13738777	0,14855151	0,15479416
	<i>ABR</i>	0,03291800	0,03596838	0,03562430	0,03537835	0,04367700

Таблица 4. Показатели живучести при коэффициентах готовности узлов 0, 9...0,95 и каналов 0, 9...0, 95

Условия эксперимента <i>VBR/ABR</i>		$CTD_{VBR}=0,5$	$CTD_{VBR}=1,0$	$CTD_{VBR}=1,5$	$CTD_{VBR}=1,5$	$CTD_{VBR}=2,0$
		$CLR_{VBR}=0,1$	$CLR_{VBR}=0,1$	$CLR_{VBR}=0,5$	$CLR_{VBR}=1,0$	$CLR_{VBR}=1,0$
		$CTD_{ABR}=1,0$	$CTD_{ABR}=1,5$	$CTD_{ABR}=2,0$	$CTD_{ABR}=2,0$	$CTD_{ABR}=3,0$
Макс. поток $H_0, \%$	<i>VBR</i>	41348	41348	41348	41348	41348
	<i>ABR</i>	20508	20508	20508	20508	20508
50	<i>VBR</i>	0,12343279	0,13554621	0,15251837	0,14590888	0,15563589
	<i>ABR</i>	0,07242135	0,10454436	0,11566799	0,10703460	0,11933226
60	<i>VBR</i>	0,12343279	0,13554621	0,15251837	0,14590888	0,16563589
	<i>ABR</i>	0,05574323	0,09372439	0,10299505	0,09595400	0,10247924
70	<i>VBR</i>	0,10311924	0,11879376	0,13141922	0,12364946	0,13432617
	<i>ABR</i>	0,05474581	0,07502698	0,08559620	0,07376873	0,08227872
80	<i>VBR</i>	0,09912219	0,11508424	0,12526089	0,11887061	0,12834836
	<i>ABR</i>	0,05273777	0,07285661	0,08100554	0,07095371	0,07782906
90	<i>VBR</i>	0,09528694	0,11261845	0,12181972	0,11607368	0,12516268
	<i>ABR</i>	0,03840283	0,04859216	0,04962787	0,4770431	0,04897579
100	<i>VBR</i>	0,07916419	0,09392104	0,10442087	0,09418841	0,10496216
	<i>ABR</i>	0,02492668	0,02769012	0,02906677	0,02852226	0,03118754

Таблица 5. Показатели живучести при коэффициентах узлов 0,95...0,99 и каналов 0,9...0,95

Условия эксперимента		$CTD_{VBR}=0,5$	$CTD_{VBR}=1,0$	$CTD_{VBR}=1,5$	$CTD_{VBR}=1,5$	$CTD_{VBR}=2,0$
VBR/ABR		$CLR_{VBR}=0,1$	$CLR_{VBR}=0,1$	$CLR_{VBR}=0,5$	$CLR_{VBR}=1,0$	$CLR_{VBR}=1,0$
		$CTD_{ABR}=1,0$	$CTD_{ABR}=1,5$	$CTD_{ABR}=2,0$	$CTD_{ABR}=2,0$	$CTD_{ABR}=3,0$
Макс. Поток $H_0, \%$	VBR	41348	41348	41348	41348	41348
	ABR	20508	20508	20508	20508	20508
50	VBR	0,25516486	0,29757829	0,25904396	0,27617694	0,29561801
	ABR	0,15646786	0,23227321	0,19732320	0,21117841	0,24035905
60	VBR	0,25516486	0,29757829	0,25904396	0,27617694	0,29561801
	ABR	0,13583718	0,19450449	0,17156661	0,17493485	0,21536696
70	VBR	0,23178433	0,27083858	0,22656087	0,23608565	0,27030143
	ABR	0,133361286	0,16200318	0,13943098	0,13219653	0,18070546
80	VBR	0,22327425	0,25623725	0,21615366	0,22685449	0,25938392
	ABR	0,12669277	0,15356948	0,13623969	0,12870194	0,17438864
90	VBR	0,21807581	0,24825101	0,21083789	0,1917135	0,25300504
	ABR	0,08144739	0,10372883	0,08858098	0,08148670	0,10564157
100	VBR	0,17614385	0,21574971	0,17870226	0,17643303	0,21534354
	ABR	0,05167945	0,06540418	0,04565101	0,04688959	0,06450231

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что на величину вероятности оказывает большое влияние изменение средней задержки доставки ячейки CTD , а варьирование вероятности потери ячеек не дает видимого эффекта. Следует отметить возможные погрешности алгоритма, поскольку при подсчете перебирались не все возможные состояния Z_k , а только некоторая их часть (см. табл. 1), и полученные данные вероятностей затем распространялись на все состояния.

Кроме того, увеличение надежных показателей (коэффициентов готовности для узлов и каналов) позволяет существенно повысить показатели живучести для всех категорий передаваемых данных.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена проблема анализа живучести компьютерных сетей. Предложены показатели живучести для компьютерных сетей с технологией ATM для разных категорий сервиса CBR , VBR и ABR .

2. Разработана методика и алгоритм оценки показателей живучести сетей ATM, который учитывает установленные показатели качества QoS для разных категорий сервиса.

3. Сформулирована задача оптимизации сети по заданным значениям показателей живучести и предложен алгоритм ее решения.

4. Поскольку для оценки показателей живучести необходимо многократно решать задачу нахождения максимального потока, то в работе рассмотрена постановка этой задачи для сетей с технологией АТМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Додонов А.Г., Кузнецова М.Г., Горбачик Е.С. Введение в теорию живучести вычислительных систем. — Киев: Наук. думка, 1990. — 184 с.
2. Зайченко Е.Ю. Анализ и синтез структуры глобальных вычислительных сетей. — Киев: ЗАО «Укрспецмонтаж», 1998. — 108 с.
3. Зайченко Ю.П., Зайченко Е.Ю. Нахождение максимального потока и анализ показателей живучести при отказах // Автоматика и телемеханика. — 1996. — № 6. — С. 102–113.
4. Зайченко О.Ю. Аналіз показників живучості мереж з технологією АТМ // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 3. — С. 14–21.
5. Зайченко О.Ю. Вибір маршрутів передачі та оптимальний розподіл потоків у мережах з технологією АТМ // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 4. — С. 16–24.
6. Зайченко О.Ю. Оптимальний вибір пропускних здатностей каналів зв'язку в мережах АТМ // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2000. — № 6. — С. 48–53.
7. Зайченко О.Ю., Зайченко Ю.П. Знаходження максимального потоку в мережах з режимом асинхронної передачі інформації // Відбір і обробка інформації. — Вип. 17(93). — 2002. — С. 59–64.

Поступила 29.01.2003