Оптимальное совместное управление трафиком и пропускной способностью программно-конфигурируемой сети с промежуточной коммутацией транзитных каналов

Optimal joint traffic and bandwidth management of a software-configured network with intermediate switching of transit channels

Одоевский / Odoevskii S.
Сергей Михайлович
(odse2017@mail.ru)
доктор технических наук, профессор.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» МО РФ (ВАС им. С. М. Буденного),
профессор кафедры сетей связи и систем коммуникаций.
г. Санкт-Петербург

Григорчук / Grigorchuk A.
Александр Николаевич
(grigorchuk.spb@mail.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
преподаватель кафедры сетей связи и систем коммуникаций.
г. Санкт-Петербург

Яговитов / Yagovitov D.
Данила Сергеевич
(danila.yagovitov@mail.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммуникаций.
г. Санкт-Петербург

Ясинский / Jasinskii S.
Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
ведущий специалист.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: оптимальное совместное управление трафиком и пропускной способностью – optimal joint traffic and bandwidth management; программно-конфигурируемая сеть – software-configurable network; искусственная нейронная сеть – artificial neural network.

Описывается модель совместного управления трафиком и пропускной способностью программно-конфигурируемой сети с промежуточной коммутацией транзитных каналов в отдельном информационном направлении. Приведены результаты аналитического решения задач оптимизации распределения потока данных и канального ресурса между двумя каналами (маршрутами) с промежуточными узлами коммутации по двум критериям минимальной обобщенной задержки для трех ситуаций различной взаимной инерционности контуров управления трафиком и пропускной способностью сети. Полученные результаты предлагается использовать для тестирования и обучения искусственных нейронных сетей, предназначенных для поддержки принятия решений по управлению трафиком и пропускной способностью программно-конфигурируемых сетей.

A model of joint traffic and bandwidth management of a software-configured network with intermediate switching of transit channels in a separate information direction is described. The results of the analytical solution of the problems of optimizing the distribution of the data flow and the channel resource between two channels (routes) with intermediate switching nodes according to two criteria of the minimum generalized delay for three situations of different mutual inertia of the traffic control circuits and network bandwidth are presented. The obtained results are proposed to be used for testing and training artificial neural networks designed to support decision-making on traffic management and bandwidth of software-configured networks.

Введение

Настоящая статья является продолжением статьи, опубликованной в предыдущем номере журнала [1], в которой рассматривалась упрощенная модель совместного управления трафиком (потоком данных – ПД) и пропускной способностью (канальным ресурсом – КР) программно-конфигурируемой сети (*Soft Defined Network – SDN*) [2, 3] без промежуточной коммутации транзитных каналов. В указанной статье были приведены рассчитанные с помощью разработанной модели графики зависимостей показателей своевременности

от долей КР и ПД (простейшего и самоподобного [4]), распределяемых между двумя каналами (маршрутами), из которых следовало существование оптимальных значений указанных долей, обеспечивающих минимальную задержку. Там же были приведены рассчитанные графики зависимостей найденных оптимальных значений долей КР и ПД друг от друга при различной контролируемой нагрузке, что было рекомендовано использовать в качестве эталонных примеров для тестирования и обучения искусственных нейронных сетей (ИНС), предназначенных для поддержки принятия решений по управлению трафиком и пропускной способностью SDN [5, 6] на отдельных информационных направлениях.

В настоящей статье описывается более сложная математическая модель совместного управления трафиком и пропускной способностью фрагмента программно-конфигурируемой сети с промежуточной коммутацией транзитных каналов в отдельном информационном направлении. На основе данной модели были решены задачи оптимизации долей ПД и КР, распределяемых между двумя каналами (маршрутами) с промежуточными узлами коммутации, по двум критериям минимальной задержки для трех ситуаций различной взаимной инерционности контуров управления ПД и КР.

Модель совместного управления трафиком и пропускной способностью фрагмента сети, состоящего из нескольких транзитных каналов с промежуточной коммутацией

Рассмотрим модель фрагмента двухуровневой *SDN* с промежуточными узлами коммутации $\{2...k_1\}$... $\{2...k_n\}$ в виде n параллельных каналов (маршрутов), между которыми на нижнем уровне в соответствии с долями $\{\gamma_i\}$, $i=\overline{1,n}$, распределяется КР $\mu = \mu_1+\ldots+\mu_n$ (в единицах пак/с), где $\mu_i = \mu \cdot \gamma_i$, а на верхнем уровне в соответствии с долями $\{\alpha_i\}$ распределяется ПД $\lambda = \lambda_1+\ldots+\lambda_n$, где $\lambda_i = \lambda \cdot \gamma_i$ (рис. 1).

По аналогии с описанной в [1] моделью без промежуточной коммутации рассмотрим два варианта обобщенного показателя задержки T_o, по-разному зависящих от суммарных задержек $T_i(\lambda_i,\mu_i)$ в отдельных маршрутах $i=\overline{1,n}$:

$$T_o = T_{o.cp} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot T_i(\lambda_i,\mu_i), \tag{1}$$

$$T_o = T_{o.\max} = \max_{i=1,\ldots,n} T_i(\lambda_i,\mu_i). \tag{2}$$

Формула (1) соответствует традиционному варианту обобщенного показателя $T_{o.cp}$, представляющего собой средневзвешенную задержку в n маршрутах, а формула (2) – соответствует варианту обобщенного показателя $T_{o.\max}$, равного максимальной задержке по всем n маршрутам.

Суммарную задержку T_i передачи пакетов данных по маршруту i можно вычислить как сумму задержек $T_{i,j}$, $j=\overline{1,k_i}$, между соседними устройствами пакетной коммутации, количество которых k_i в общем случае может быть различным на каждом из маршрутов $i=\overline{1,n}$:

$$T_i(\lambda_i,\mu_i) = \sum_{j=1}^{k_i} T_{i,j}(\lambda_{i,j},\mu_{i,j}), \tag{3}$$

где $\lambda_{i,j}$ – интенсивность ПД на i-м маршруте на выходе j-го устройства коммутации; $\mu_{i,j}$ – интенсивность обслуживания, характеризующая пропускную способность (канальный ресурс) j-го участка на i-м маршруте.

В общем случае интенсивности ПД $\lambda_{i,j}$ и КР $\mu_{i,j}$ на отдельных участках j каждого i-го маршрута могут превышать выделенные для данного маршрута интенсивности ПД λ_i и КР μ_i в интересах рассматриваемого отдельного информационного направления, что позволяет учитывать совместное использование данных участков в интересах разных информационных направлений. Однако в настоящей статье ограничимся учетом долей ПД и КР, касающихся только одного рассматриваемого информационного направления, что косвенно отражает специфику виртуальных каналов, формируемых в каждом маршруте для отдельных потоков данных [7]. Соответ-

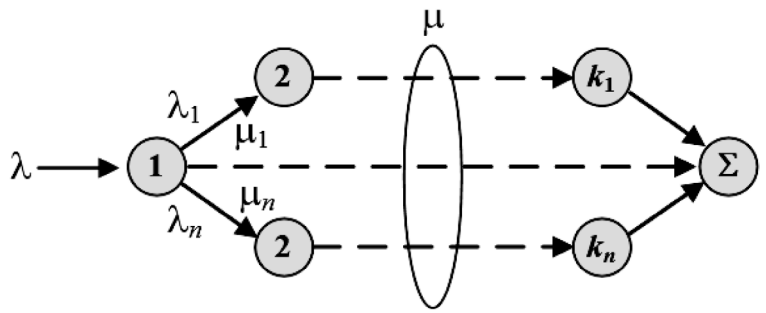

Рис. 1. Модель фрагмента сети, состоящего из нескольких транзитных каналов с промежуточной коммутацией

ственно, будем считать, что $\lambda_{i,j} = \lambda_i$ и $\mu_{i,j} = \mu_i \ \forall j$. При этом полагая, что все участки отдельных маршрутов описываются одинаковыми моделями систем массового обслуживания (СМО), формула (3) может быть преобразована к виду:

$$T_i(\lambda_i,\mu_i) = k_i \cdot T(\lambda_i,\mu_i), \tag{4}$$

где $T(\lambda,\mu)$ – зависимость средней задержки T от интенсивности ПД λ ($=\lambda_i$) на входе и пропускной способности μ ($=\mu_i$) канала на выходе любого отдельного устройства коммутации. В настоящей статье предполагается, что данная зависимость соответствует рассмотренной в [1] модели СМО М/М/1:

$$T(\lambda,\mu) = 1/(\mu-\lambda), \tag{5}$$

Формулу (4) можно рассматривать как верхнюю оценку суммарной задержки в i-м маршруте (как расчет на наихудший случай), поскольку в ней предполагается одинаковая случайная структура сквозного потока на входе каждого очередного пути. В [7] приведены варианты модификации формулы (4) с учетом механизмов, устраняющих случайную структуру ПД после первого коммутационного устройства, но в данной статье они не рассматриваются, поскольку являются более простыми частными случаями приведенных далее результатов.

С учетом выражений (4) и (5), а также введенных ранее обозначений долей ПД и КР формулы расчета обобщенных показателей задержки (1) и (2) можно представить в виде:

$$T_o = T_{o.cp} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot k_i / (\gamma_i \cdot \mu - \alpha_i \cdot \lambda), \tag{6}$$

$$T_o = T_{o.\max} = \max_{i=1,\dots,n} k_i / (\gamma_i \cdot \mu - \alpha_i \cdot \lambda). \tag{7}$$

По аналогии с [1] решение задачи оптимизации совместного управления трафиком и пропускной способностью по критерию минимизации среднего времени задержки (6) можно свести к решению системы уравнений, формируемых на основе метода множителей Лагранжа для учета условий:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1, \quad \sum_{i=1}^{n} \gamma_i = 1 \tag{8}$$

с дополнительным контролем ограничений $0 \le \alpha_i \le 1$ и $0 \le \gamma_i \le 1$, $\forall i = 1,\dots,n$.

При использовании критерия минимизации максимального времени задержки (7) решение задачи можно свести к решению системы уравнений, формируемых на основе условия выравнивания задержек для всех невырожденных каналов (т.е., $\forall i \to \alpha_i > 0$ и/или $\gamma_i > 0$).

Для случая отсутствия промежуточных узлов коммутации, т.е. когда $k_i = 1$, $\forall i = 1,\dots,n$, в [8] приведены аналитические результаты решения задачи оптимизации распределения ПД и КР в общем алгоритмическом и частично аналитическом виде для любого числа $n \ge 2$ одноинтервальных маршрутов (каналов), представляемых n моделями СМО М/М/1. На основании приведенных в [8] формул в [9] получены более простые математические выражения для случая использования $n = 2$ каналов. В данной статье приведено далее аналитическое решение указанных задач оптимизации для более общего случая наличия промежуточных узлов коммутации т.е. когда $k_i \ge 1$, $\forall i = 1,\dots,n$, но при таком же, как в [9], количестве каналов $n = 2$.

Решение задач оптимизации совместного управления трафиком и пропускной способностью фрагмента сети, состоящего из двух транзитных каналов с промежуточной коммутацией

При использовании только двух маршрутов n=2 распределение трафика между ними описывается двумя долями $\alpha_1=\alpha$, $\alpha_2=1-\alpha$, зависящими фактически от одного параметра $\alpha \in [0,1]$. Аналогичным образом распределение канального ресурса между ними описывается двумя долями $\gamma_1=\gamma$, $\gamma_2=1-\gamma$, зависящими от одного параметра $\gamma \in [0,1]$. При этом указанные выше обобщенные показатели задержки $T_{o.cp}$ (6) и $T_{o\max}$ (7) будут зависеть от управляемых параметров разделения трафика α и канального ресурса γ, а также от нормированной интенсивности пакетов λ, эквивалентной интенсивности нагрузки $\rho = \lambda/\mu$ при μ=1 следующим образом:

$$T_o = T_{o.cp} = \alpha \cdot k_1/(\gamma - \lambda \cdot \alpha) + (1-\alpha) \cdot k_2/((1-\gamma) - \lambda \cdot (1-\alpha)) \tag{9}$$

$$T_o = T_{o.\max} = \max\left(k_1/(\gamma - \lambda \cdot \alpha), k_2/((1-\gamma) - \lambda \cdot (1-\alpha))\right) \tag{10}$$

Решение задачи оптимизации управления распределением трафика при заданном (контролируемом) распределении канального ресурса или распределением канального ресурса при заданном (контролируемом) распределении трафика по критерию минимума среднего времени задержки было сведено к решению уравнения, сформированного на основе условия минимума функции (9) путем взятия производной от данного выражения по параметру α или по параметру γ и приравнивания ее нулю с дополнительным контролем допустимого диапазона значений $0 \le \alpha \le 1$ и $0 \le \gamma \le 1$.

При использовании критерия минимизации максимального времени задержки (10) решение указанной выше задачи оптимизации было получено путём её сведения к решению уравнения, сформированного на основе другого признака экстремума, а именно – равенства задержек в обоих невырожденных маршрутах (т.е., когда $0 < \alpha < 1$ или $0 < \gamma < 1$).

С помощью описанных выше методов решения оптимизационных задач были получены аналитические выражения для расчета оптимальных значений управляемых параметров (долей) ПД α^* и КР γ^*, при которых достигается минимум обобщенных показателей задержки $T^*_{\text{о.ср.}}$ и $T^*_{o.\max}$ с учетом контролируемых параметров λ, γ и α для каждой из трех рассмотренных в [1] ситуаций различной взаимной инерционности и согласованности контуров управления распределением долей ПД на верхнем уровне и долей КР на нижнем уровне SDN.

Найденные функциональные зависимости для первых двух ситуаций представлены в аналитическом виде в таблицах 1 и 2 для случаев оптимального управления распределением трафика и канального ресурса по критериям min $T_{\text{о.ср}}$ и min $T_{o.\max}$, соответственно. Полученные результаты оптимизации по обоим критериям для третьей ситуации представлены в таблице 3.

В первой ситуации, когда инерционность контура управления КР на нижнем уровне намного больше инерционности контура управления ПД на верхнем уровне, оптимальное управление распределением трафика предполагает преобразование контролируемых значений параметров λ и γ в зависимости от выбранного критерия эффективности (обобщенного показателя задержки) в оптимальное значение управляемого параметра $\alpha^*_{\text{ср.1}}(\lambda,\gamma)$, который обеспечивает минимальное значение обобщенного показателя средней задержки $T^*_{\text{о.ср.1}}(\lambda,\gamma)$ (таблица 1), или

Таблица 1

Функциональные зависимости, характеризующие оптимальные распределения ПД и КР по критерию min $T_{\text{о.ср}}$ при разной инерционности контуров управления (в ситуациях 1 и 2)

Ситуация 1

$$\alpha^*_{\text{ср.1}} = \begin{cases} 0, & (\gamma < k_1/k_1+k_2) \cap (\lambda < \lambda_0(\gamma)) \\ \alpha^{**}_{\text{ср}}(\lambda,\gamma), & (\gamma = k_1/k_1+k_2) \cap (\lambda \ge \lambda_0(\gamma)) \\ 1, & (\gamma > k_1/k_1+k_2) \cap (\lambda < \lambda_0(\gamma)) \end{cases},$$

где

$$\alpha^{**}_{\text{ср}}(\lambda,\gamma) = \frac{1}{\lambda}\cdot\left[\gamma - \frac{(1-\lambda)\cdot\sqrt{\gamma\cdot k_1}}{\sqrt{\gamma\cdot k_1}+\sqrt{(1-\gamma)}\cdot k_2}\right],$$

$$\lambda_0(\gamma) = \begin{cases} (1-\gamma) - \sqrt{\gamma}\cdot\sqrt{1-\gamma}\cdot\sqrt{\dfrac{k_2}{k_1}}, & \gamma \le k_1/(k_1+k_2) \\ \gamma - \sqrt{\gamma}\cdot\sqrt{1-\gamma}\cdot\sqrt{\dfrac{k_1}{k_2}}, & \gamma > k_1/(k_1+k_2) \end{cases}.$$

$$T^*_{\text{о.ср.1}} = \begin{cases} \dfrac{k_2}{(1-\gamma)-\lambda}, & (\gamma < k_1/(k_1+k_2)) \cap (\lambda < \lambda_0(\gamma)) \\ T^{**}_{\text{о.ср}}(\lambda,\gamma), & (\gamma = k_1/(k_1+k_2)) \cup (\lambda \ge \lambda_0(\gamma)), \\ \dfrac{k_1}{\gamma-\lambda}, & (\gamma > k_1/(k_1+k_2)) \cap (\lambda < \lambda_0(\gamma)) \end{cases}$$

где

$$T^{**}_{\text{о.ср.1}}(\lambda,\gamma) = \frac{\left(\sqrt{\gamma\cdot k_2}+\sqrt{(1-\gamma)\cdot k_1}\right)^2 + \lambda\cdot(k_1+k_2) - 2\cdot\left(\gamma\cdot k_2 + (1-\gamma)\cdot k_1\right)}{\lambda\cdot(1-\lambda)}.$$

Ситуация 2

$$\gamma^*_{\text{ср.2}}(\lambda,\alpha) = \lambda\cdot\alpha + \frac{(1-\lambda)\cdot\sqrt{\alpha\cdot k_1}}{\sqrt{\alpha\cdot k_1}+\sqrt{(1-\alpha)}\cdot k_2},$$

$$T^*_{\text{о.ср.2}}(\lambda,\alpha) = \frac{\left(\sqrt{\alpha\cdot k_1}+\sqrt{(1-\alpha)}\cdot k_2\right)^2}{1-\lambda}.$$

Таблица 2

Функциональные зависимости, характеризующие оптимальные распределения ПД и КР по критерию min $T_{o.\max}$ при разной инерционности контуров управления (в ситуациях 1 и 2)

Ситуация 1
$$\alpha^*_{\max.1}=\begin{cases}0, & (\gamma<k_1/(k_1+k_2))\cap(\lambda<\lambda_m(\gamma))\\ \alpha^{**}_{\max}(\lambda,\gamma), & (\gamma=k_1/(k_1+k_2))\cup(\lambda\ge\lambda_m(\gamma))\\ 1, & (\gamma>k_1/(k_1+k_2))\cap(\lambda<\lambda_m(\gamma))\end{cases},$$ где $$\alpha^{**}_{\max}(\lambda,\gamma)=\frac{1}{\lambda}\cdot\left[\gamma-\frac{(1-\lambda)\cdot k_1}{k_1+k_2}\right],$$ $$\lambda_m(\gamma)=\begin{cases}1-\gamma\cdot(k_1+k_2)/k_1, & \gamma\le k_1/(k_1+k_2)\\ ((k_1+k_2)\cdot\gamma-k_1)/k_2, & \gamma>k_1/(k_1+k_2)\end{cases}.$$ $$T^*_{o.\max.1}=\begin{cases}\dfrac{k_2}{(1-\gamma)-\lambda}, & (\gamma<k_1/(k_1+k_2))\cap(\lambda<\lambda_m(\gamma))\\ \dfrac{k_1+k_2}{1-\lambda}, & (\gamma=k_1/(k_1+k_2))\cup(\lambda\ge\lambda_0(\gamma))\\ \dfrac{k_1}{\gamma-\lambda}, & (\gamma>k_1/(k_1+k_2))\cap(\lambda<\lambda_0(\gamma))\end{cases}.$$
Ситуация 2
$$\gamma^*_{\max.2}(\lambda,\alpha)=\begin{cases}0, & \alpha=0\\ \alpha\cdot\lambda+(1-\lambda)\cdot k_1/(k_1+k_2), & 0<\alpha<1\\ 1, & \alpha=1\end{cases}$$ $$T^*_{o.\max.2}(\lambda,\alpha)=\begin{cases}k_2/(1-\lambda), & \alpha=0\\ (k_1+k_2)/(1-\lambda), & 0<\alpha<1\\ k_1/(1-\lambda), & \alpha=1\end{cases}.$$

параметра $\alpha^*_{\max.1}(\lambda,\gamma)$, который обеспечивает минимальное значение обобщенного показателя максимальной задержки $T^*_{o.\max.1}(\lambda,\gamma)$ (таблица 2).

Во второй ситуации, когда инерционность контура управления КР на нижнем уровне намного меньше инерционности контура управления ПД на верхнем уровне, оптимальное управление распределением канального ресурса предполагает преобразование контролируемых значений параметров λ и α в зависимости от выбранного критерия в оптимальное значение управляемого параметра $\gamma^*_{ср.2}(\lambda,\alpha)$, который обеспечивает минимальное значение обобщенного показателя средней задержки $T^*_{o.ср.2}(\lambda,\alpha)$ (таблица 1), или параметра $\gamma^*_{\max.2}(\lambda,\alpha)$, который обеспечивает минимальное значение обобщенного показателя максимальной задержки $T^*_{o.\max.2}(\lambda,\alpha)$ (таблица 2).

В третьей ситуации (таблица 3), когда инерционности контуров управления ПД и КР на обоих уровнях соизмеримы, оптимальное управление распределением трафика и канального ресурса предполагает преобразование контролируемого значения параметра λ в зависимости от выбранного критерия в оптимальные значения управляемых параметров $\alpha^*_{ср.3}$ и $\gamma^*_{ср.3}$, которые обеспечивают минимальное значение обобщенного показателя средней задержки $T^*_{o.ср.3}(\lambda)$, или параметров $\alpha^*_{\max.3}$ и $\gamma^*_{\max.3}$, которые обеспечивают минимальное значение обобщенного показателя максимальной задержки $T^*_{o.\max.3}(\lambda)$. Такое оптимальное управление соответствует варианту наилучшего взаимодействия контуров управления на обоих уровнях.

В третьей ситуации при соизмеримой инерционности контуров управления ПД и КР возможно также не наилучшее, а наихудшее взаимодействие, когда один из контуров управления ПД или КР по ошибке или сознательно (например, вследствие компьютерных атак) стремится не к снижению, а к увеличению

Таблица 3

Функциональные зависимости, характеризующие оптимальные распределения ПД и КР при соизмеримой инерционности контуров управления (в ситуации 3)

Оптимальное управление по критерию min $T_{\text{о.ср}}$
Вариант наилучшего взаимодействия
$\alpha^*_{\text{ср.3}} = \gamma^*_{\text{ср.3}} = \begin{cases} 0, k_1 > k_2 \\ 1, k_1 \le k_2 \end{cases}$, $T^*_{\text{о.ср.3}}(\lambda) = \min(k_1, k_2)/(1-\lambda)$.
Варианты наихудшего взаимодействия
$\gamma^*_{\text{ср.31}} = k_1/(k_1+k_2)$, $\alpha^*_{\text{ср.31}} = \alpha^*_{\text{ср.1}}(\lambda, \gamma^*_{\text{ср.31}}) = k_1/(k_1+k_2)$, $\alpha^*_{\text{ср.32}} = k_1/(k_1+k_2)$, $\gamma^*_{\text{ср.32}} = \gamma^*_{\text{ср.2}}(\lambda, \alpha^*_{\text{ср.32}}) = k_1/(k_1+k_2)$, $T^*_{\text{о.ср.31}}(\lambda) = T^*_{\text{о.ср.32}}(\lambda) = (k_1+k_2)/(1-\lambda)$.
Оптимальное управление по критерию min $T_{o.\max}$
Вариант наилучшего взаимодействия
$\alpha^*_{\max.3} = \gamma^*_{\max.3} = \begin{cases} 0, k_1 > k_2 \\ 1, k_1 \le k_2 \end{cases}$, $T^*_{o.\max.3}(\lambda) = \min(k_1, k_2)/(1-\lambda)$.
Варианты наихудшего взаимодействия
$\gamma^*_{\max.31} = k_1/(k_1+k_2)$, $\alpha^*_{\max.31} = \alpha^*_{\max.1}(\lambda, \gamma^*_{\max.31}) = k_1/(k_1+k_2)$, $\alpha^*_{\max.32} = k_1/(k_1+k_2)$, $\gamma^*_{\max.32} = \gamma^*_{\max.2}(\lambda, \alpha^*_{\max.32}) = k_1/(k_1+k_2)$, $T^*_{o.\max.31}(\lambda) = T^*_{o.\max.32}(\lambda) = (k_1+k_2)/(1-\lambda)$.

задержки. Но другой контур управления продолжает стремиться к минимизации задержки, что в подобной игровой ситуации [10] позволяет обеспечить конечную минимальную гарантированную задержку, представленную в таблице 3 для двух вариантов наихудшего взаимодействия.

Первому варианту наихудшего взаимодействия в третьей ситуации соответствует в зависимости от выбранного критерия задание управляемого параметра $\gamma^*_{\text{ср.31}}$, при котором обеспечивается максимальное значение минимального обобщенного показателя средней задержки $T^*_{\text{о.ср.31}}(\lambda) = T^*_{\text{о.ср.1}}(\lambda, \gamma^*_{\text{ср.31}})$ при задании управляемого параметра $\alpha^*_{\text{ср.1}}(\lambda, \gamma^*_{\text{ср.31}})$, или параметра $\gamma^*_{\max.31}$, при котором обеспечивается максимальное значение минимального обобщенного показателя максимальной задержки $T^*_{\text{о.max.31}}(\lambda) = T^*_{\text{о.max.1}}(\lambda, \gamma^*_{\max.31})$ при задании управляемого параметра $\alpha^*_{\max.1}(\lambda, \gamma^*_{\max.31})$.

Второму варианту наихудшего взаимодействия в третьей ситуации соответствует в зависимости от выбранного критерия задание управляемого параметра $\alpha^*_{\text{ср.32}}$, при котором обеспечивается максимальное значение минимального обобщенного показателя средней задержки $T^*_{\text{о.ср.32}}(\lambda) = T^*_{\text{о.ср.2}}(\lambda, \alpha^*_{\text{ср.32}})$ при задании управляемого параметра $\gamma^*_{\text{ср.2}}(\lambda, \alpha^*_{\text{ср.32}})$, или параметра $\alpha^*_{\max.32}$, при котором обеспечивается максимальное значение минимального обобщенного показателя максимальной задержки $T^*_{\text{о.max.32}}(\lambda) = T^*_{\text{о.max.2}}(\lambda, \alpha^*_{\max.32})$ при задании управляемого параметра $\gamma^*_{\max.2}(\lambda, \alpha^*_{\max.32})$.

Заключение

В настоящей статье представлена математическая модель совместного управления трафиком и пропускной способностью фрагмента программно-конфигурируемой сети с промежуточной коммутацией транзитных каналов в отдельном информационном направлении. На основе данной модели были решены задачи оптимизации распределения ПД и КР между двумя каналами (маршрутами) с промежуточными узлами коммутации по двум критериям минимальной обобщенной задержки для трех ситуаций различной взаимной инерционности контуров управления ПД и КР. Приведенные результаты аналитического решения задач оптимизации обобщают, дополняют и конкретизируют результаты, приведенные в [1], что позволяет уточнить и расширить состав типовых эталонных решений, которые предлагается использовать для тестирования и обучения

искусственных нейронных сетей, предназначенных для поддержки принятия решений по управлению трафиком и пропускной способностью программно-конфигурируемых сетей.

Литература

1. Модель совместного управления трафиком и пропускной способностью программно-конфигурируемой сети без промежуточной коммутации транзитных каналов / С.М. Одоевский [и др.] // Информация и Космос. – 2021. – № 3. – С. 24–30.

2. Лемешко, А. В. Разработка и исследование потоковой модели адаптивной маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях с балансировкой нагрузки / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Управление, вычислительная техника и информатика. Доклады ТУСУР. – 2013. – № 3 (29). – С. 100–108.

3. Гузев, О. Ю. Балансировка нагрузки в защищенных сетях с использованием технологии SDN / О.Ю. Гузев, И.В. Чижов // Системы и средства информатики. – 2018. – Т. 28, № 1. – С. 123–138.

4. Одоевский, С. М. Методы прогнозирования качества обслуживания самоподобного трафика в устройствах коммутации мультисервисной сети / С.М. Одоевский, В.П. Хоборова // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3, № 3. – С. 86–92.

5. Перепелкин, Д. А. Нейросетевое прогнозирование состояния структуры программно-конфигурируемой сети / Д.А. Перепелкин, М.А. Иванчикова // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020: Сборник трудов III Международного научно-технического форума: в 10 т., Рязань, 04–06 марта 2020. – 2020. – Т. 3. – С. 115–117.

6. Яговитов, Д. С. Балансировка нагрузки в программно-конфигурируемых инфокоммуникационных сетях специального назначения с применением нейронных сетей / Д.С. Яговитов, Е.А. Долматов // Инновационная деятельность в Вооруженных Силах Российской Федерации: Труды всеармейской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14–15 октября 2020. – 2020. – С. 257–260.

7. Обобщенная методика оптимизации совместного управления трафиком и пропускной способностью мультисервисной системы связи / С.М. Одоевский [и др.] // Информация и Космос. – 2021. – № 2. – С. 37–44.

8. Одоевский, С. М. Оптимизация управления распределением трафика на смежных уровнях сетевой архитектуры / С.М. Одоевский, О.В. Яровикова // III Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сборник научных статей, Санкт-Петербург, 25–26 февраля 2014. – С. 323–328.

9. Одоевский, С. М. Оптимизация инжиниринга трафика на смежных уровнях сетевой архитектуры / С.М. Одоевский, А.К. Кочешков, В.П. Хоборова // Сб. науч. статей VI МНТК «Современное состояние и перспективы развития систем связи и РТО в управлении авиацией», Воронеж, 2017. – С. 138–142.

10. Одоевский, С. М. Граничные оценки эффективности управления распределением ресурсов пропускной способности транспортной сети при различной инерционности контуров управления / С.М. Одоевский, О.В. Яровикова // Сб. науч. статей II МНТ и НМК «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», Санкт-Петербург, 26–27 февраля 2013. – 2013. – С. 489–492.