

УДК 621.391

Старкова Е. В. Тел.: +380 (67) 541 22 33. E-mail: elena_starkova@ukr.net

(Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев)

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ TCP-СЕАНСОВ В СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ

Starkova O. V. Analysis of TCP-session stability in the modern computer networks. Practice shows that guaranteeing of quality of service QoS (Quality of Service) in the modern computer networks depends on the effectiveness of traffic management tasks, and here an important role play the functions performed by the transport layer of Open Systems Interconnection reference model. At this level, the most common is the TCP protocol which refers to effective solutions of many problems related to traffic management, such as ensuring reliable delivery of messages, end-to-end QoS performance, network load balancing etc. This work is devoted to the improvement of data transport management means at the transport level by developing mathematical TCP-sessions model and their stability analysis and optimization methods that made it possible to improve the multiservice computer network performance. A number of requirements to models and techniques is formulated on the basis of modern traffic management means. According to them a mathematical model of TCP-sessions is improved. The model is represented by a system of nonlinear differential equations that reflect the dynamics of information exchange within the TCP and takes into account the features of functioning AQM-algorithms RED/WRED. A method of TCP-sessions stability analysis within the obtained model on the bifurcation theory basis is developed. This is allowed to obtain the TCP-sessions stability conditions.

Keywords: computer network, traffic management, congestion control, TCP protocol, bifurcation theory, TCP-session model, TCP-session stability

Старкова О. В. Анализ стойкости TCP-сеансов в современных компьютерных сетях. Практика показывает, что обеспечение гарантий качества обслуживания QoS (Quality of Service) в современных компьютерных сетях непосредственно зависит от результативности задач управления трафиком, в ходе решения которых важную роль играют функции, выполняемые транспортным уровнем эталонной модели взаимодействия открытых систем. На этом уровне наиболее распространенным является протокол TCP, который относится к эффективным средствам решения многих задач, связанных с управлением трафиком. В работе предложена динамическая модель TCP-сеансов, представленная системой нелинейных дифференциальных уравнений. С применением теории бифуркаций получены условия устойчивости TCP-сеансов.

Ключевые слова: компьютерная сеть, управление трафиком, контроль перегрузки, протокол TCP, теория бифуркаций, модель TCP-сеансов, устойчивость TCP-сеансов

Старкова Е. В. Анализ устойчивости TCP-сеансов современных компьютерных сетей. Практика показывает, что обеспечение гарантий качества обслуживания QoS (Quality of Service) в современных компьютерных сетях напрямую зависит от результативности задач управления трафиком, в ходе решения которых немаловажную роль играют функции, выполняемые транспортным уровнем эталонной модели взаимодействия открытых систем. На этом уровне наиболее распространенным является протокол TCP, который относится к эффективным средствам решения многих задач, связанных с управлением трафиком. В работе предложена динамическая модель TCP-сеансов, представленная системой нелинейных дифференциальных уравнений. С применением теории бифуркаций получены условия устойчивости TCP-сеансов.

Ключевые слова: компьютерная сеть, управление трафиком, контроль перегрузки, протокол TCP, теория бифуркаций, модель TCP-сеансов, устойчивость TCP-сеансов

Введение. Как показал проведенный анализ [1], современные и перспективные мультисервисные компьютерные сети развиваются в направлении внедрения концепции сетей следующего поколения NGN (Next Generation Network). При этом в соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи МСЭ-Т (International Telecommunication Union, ITU-T) серии Y.2000 в основу NGN закладывается стек протоколов TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) [2].

Практика показывает, что обеспечение гарантий качества обслуживания QoS (Quality of Service) в компьютерной сети напрямую зависит от результативности задач управления трафиком, в ходе решения которых немаловажную роль играют функции, выполняемые транспортным уровнем эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМОС). На этом уровне наиболее распространенным является протокол TCP [2, 3], который относится к

ефективним средствам решения многих задач, связанных с управлением трафиком, таких как обеспечение надежной доставки сообщений, межконцевых показателей QoS, сбалансированной загрузки сети и других.

Однако несовершенство положенных в основу TCP математических моделей и эвристических схем нередко сопровождается необоснованным выбором численных значений основных режимов и параметров протокола. Это в свою очередь приводит к потере устойчивости TCP-сеансов, что проявляется на практике в их колебательном режиме и медленной сходимости, и, как результат, в росте потерь пакетов и снижении качества обслуживания в компьютерных сетях в целом.

Следовательно, актуальной является научная задача, которая состоит в усовершенствовании средств управления передачей данных на транспортном уровне ЭМВОС путем разработки математической модели TCP-сеансов и методов анализа их устойчивости и оптимизации, что позволит повысить производительность компьютерных сетей.

Математическая модель TCP-сеансов с использованием AQM-алгоритмов. С целью математического описания одновременно функционирующих TCP-сеансов с учетом классов обслуживания в соответствии с версией TCP Tahoe [2, 3] динамику многопоточкового информационного обмена с учетом AQM-алгоритмов (Active Queue Management) отображается в виде системы уравнений:

$$\frac{d\lambda_i^k(t)}{dt} = \begin{cases} \text{режим slow start:} \\ (1 - P^k(t)) \cdot \frac{MSS}{RTT^k} \cdot \lambda_i^k(t) - P^k(t) \cdot (\lambda_i^k(t))^2 + P^k(t) \cdot MSS \cdot \lambda_i^k(t); \\ \text{режим congestion avoidance :} \\ (1 - P^k(t)) \cdot \left(\frac{MSS}{8 \cdot RTT^k} \cdot \lambda_i^k(t) + \frac{MSS \cdot MSS}{(RTT^k)^2} \right) - \\ - P^k(t) \cdot (\lambda_i^k(t))^2 + P^k(t) \cdot MSS \cdot \lambda_i^k(t), \end{cases} \quad (1)$$

где λ_i^k – интенсивность трафика i -го TCP-сеанса в потоке с k -м классом обслуживания, ($i = \overline{1, M^k}$), M^k – количество TCP-сеансов в k -м потоке, $k = \overline{1, K}$, K – количество классов обслуживания;
 RTT^k – время оборота пакетов k -го потока;
 P^k – вероятность отбрасывания (блокировки) пакетов с k -м классом обслуживания.

Вероятность отбрасывания пакетов может быть формализована в соответствии с AQM-алгоритмами [4-6], реализующими превентивное ограничение очереди до ее фактического переполнения.

С целью подтверждения соответствия предложенной модели (1) процессу передачи данных в реальных условиях TCP-сеансов было проведено исследование одного TCP-сеанса, в ходе которого вычислялась интенсивность $\lambda(t)$. Графически решения уравнений (1) при различных значениях RTT изображено на Рис. 1.

Из Рис. 1 видно, что, во-первых, изменение скорости передачи $\lambda(t)$ носит колебательный характер и в некоторый момент времени устанавливается на определенном значении, что соответствует реальному процессу информационного обмена при работе протокола TCP. Во-вторых, с уменьшением времени оборота сегмента RTT (что говорит, например, об улучшении канала либо свободных канальных и буферных ресурсах) интенсивность, которую достигает TCP-поток в установившемся режиме, возрастает и стремится к значению пропускной способности соединения.

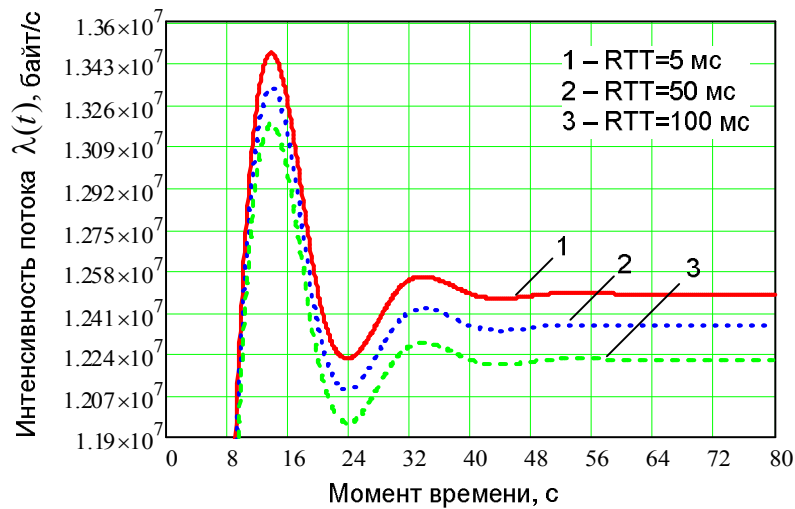


Рис. 1. Изменение интенсивности передачи данных в TCP-сеансе при различных значениях RTT

Полученная модель (1) носит четко выраженный нелинейный характер, что с математической точки зрения означает возможное наличие неединственного решения системы уравнений, более того наличие решений, являющихся неустойчивыми и приводящих к качественным изменениям поведения системы в тех или иных условиях.

На практике же, как показал анализ, к потере устойчивости приводит колебание как внешних, так и внутренних параметров и условий функционирования. К внутренним относятся параметры протокола TCP, AQM-алгоритмов (в рамках предложенной модели алгоритм RED) и режимы передачи в соответствии с версией TCP. К внешним параметрам, приводящим к неустойчивости TCP-сеанса, относятся изменение структуры сети (выход из строя либо добавление сетевых каналов и узлов, что влечет изменение доступной пропускной способности), скачкообразное изменение интенсивности передаваемого трафика, увеличение задержек распространения, а также присутствие других типов трафиков (с учетом транзитных потоков и коротко живущих соединений).

Исследование реакции TCP-сеанса на колебания либо административные изменения указанных параметров и дальнейшего поведения осуществляется путем внесения изменений в исходную систему уравнений (1). Изменения касаются либо параметров, входящих в состав системы уравнений (1), либо самой структуры и вида дифференциальных уравнений.

На Рис. 2 приведены случаи потери устойчивости, под которой подразумевается отклонение TCP-сеанса от стационарного состояния.

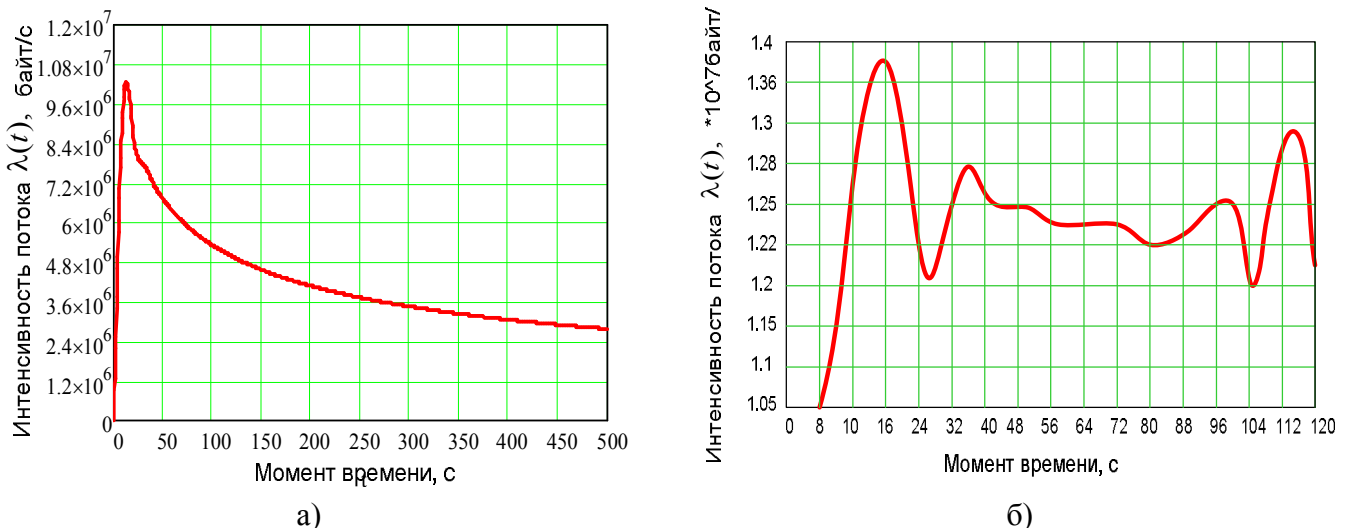


Рис. 2. Изменение интенсивности передачи данных при неустойчивом TCP-сеансе

В данном случае стационарным состоянием является режим, когда интенсивность ТСП-потока со временем устанавливается на значении, близком к реальной пропускной способности соединения.

Таким образом, стоит подчеркнуть необходимость решения такой задачи, как обнаружение и анализ причин и последствий неустойчивого функционирования ТСП-сеансов. Эти исследования позволят еще на этапе математического описания компьютерных сетей, которое впоследствии будет основой для перспективных сетевых протоколов и технологий, избежать непредвиденных случаев разрыва сеансов, роста задержек, перегрузок сетевых устройств и каналов, а, следовательно, и потерь пакетов.

Анализ устойчивости ТСП-сеансов как динамической системы. Проведенный анализ постановки и решения задачи исследования устойчивости динамических систем [9-12], к которым относится ТСП-сеанс, представленных нелинейными дифференциальными уравнениями, свидетельствует о целесообразности использования возможностей теории бифуркаций и теории катастроф. Особенностями применения этих теорий является возможность проанализировать динамику поведения процессов, которыми характеризуется система в окрестности ее стационарного состояния как с помощью аналитических выражений, так и с помощью графического представления (фазовых портретов).

Возможности теории бифуркаций и теории катастроф позволяют вычислить все равновесные состояния исходной системы и проанализировать влияние колебаний внутренних и внешних параметров на возможность скачкообразного перехода в то или иное состояние, которое может быть как устойчивым, так и неустойчивым. Причем с учетом особенностей процессов, протекающих в компьютерных сетях и проявляющихся в постоянных колебаниях сетевых параметров (пропускной способности, интенсивностей трафиков, структуры сети), такая возможность является немаловажной, т.к. позволяет решить задачу не только анализа влияния этих колебаний на поведение компьютерных сетей, но и синтеза, т.е. выбора структурных и функциональных параметров сети с учетом условий устойчивости. Решение такой задачи позволит избежать случаев потери устойчивости, т.е. неоправданных перегрузок сети и связанных с этим потерь пакетов данных.

Однако наиболее адекватным для анализа устойчивости представляется математический аппарат теории бифуркаций [11, 12], поскольку он основывается на моделях, описываемых дифференциальными уравнениями, и не требует необходимости построения специфических функций, как в случаях применения методов Ляпунова и теории катастроф. В рамках данной теории обеспечивается непосредственный учет параметров и переменных на уровне математического описания исходной динамической модели.

Использование математического аппарата теории бифуркаций [11, 12] для решения исходной задачи анализа и формулировки условий обеспечения устойчивости системы ТСП-сеансов (1), предполагает следующая последовательность действий:

1. Поиск стационарных состояний системы дифференциальных уравнений.
2. Формирование матрицы Якоби и разложение исходных уравнений в ряд Тейлора в окрестности полученных решений (линеаризация).
3. Получение системы однородных линейных дифференциальных уравнений.
4. Вывод характеристического уравнения и нахождение его корней (собственных значений) и собственных векторов.
5. Построение траектории состояний системы (фазового пространства) и анализ поведения системы в окрестностях стационарных состояний. При этом вид траекторий состояний системы в окрестности стационарной точки (устойчивый/неустойчивый узел, седло и т.д.) определяется корнями характеристического уравнения.

Исходя из значений корней характеристического уравнения, формулируются следующие условия обеспечения устойчивости ТСР-сеансов:

1) для равновесного состояния типа устойчивого узла (Рис. 3):

$$p_1(\lambda, P) \neq p_2(\lambda, P), p_1(\lambda, P) < 0, p_2(\lambda, P) < 0; \quad (2)$$

2) для равновесного состояния типа устойчивого фокуса (Рис. 4):

$$p_{1,2}(\lambda, P) = \alpha \pm i\beta, \alpha > 0. \quad (3)$$

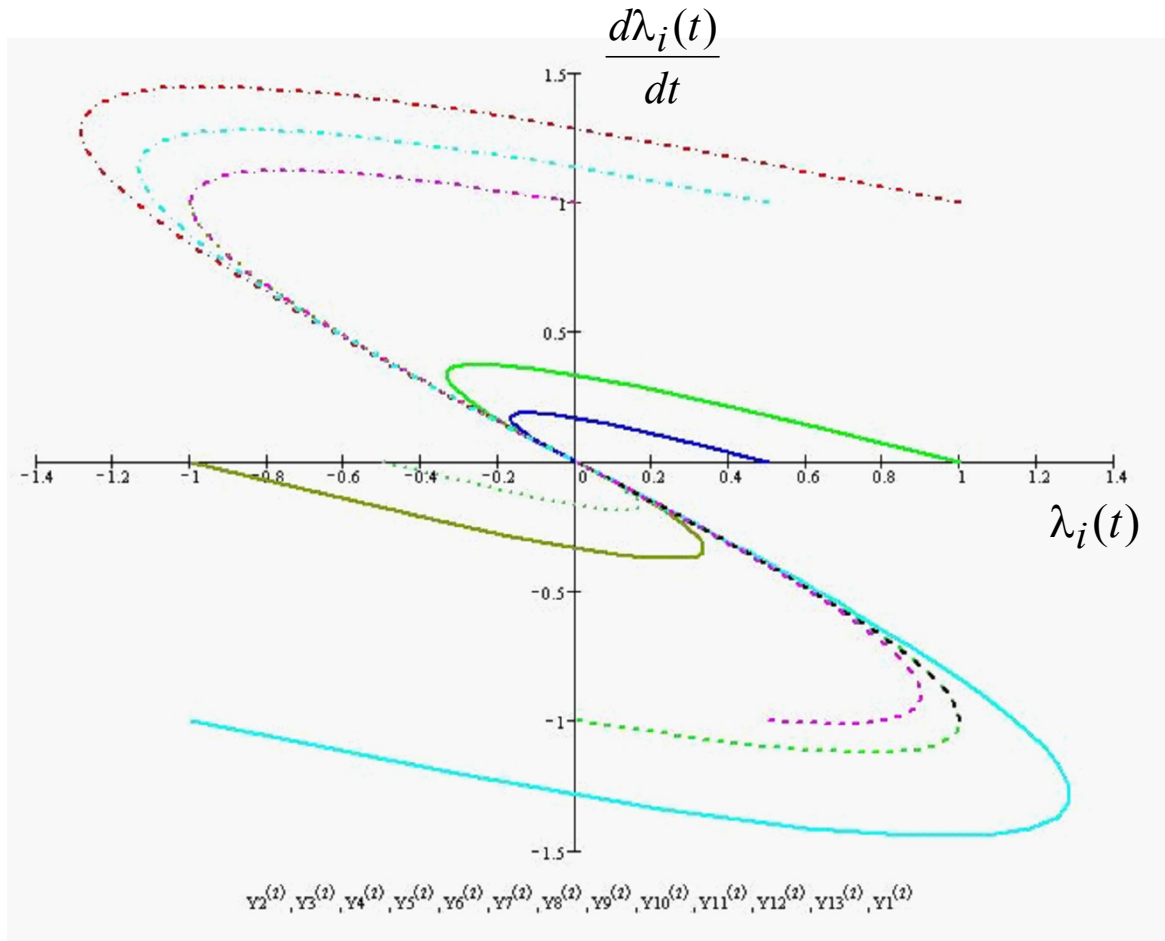


Рис. 3. Фазовый портрет системы ТСР-сеансов: равновесная точка типа устойчивый узел

Таким образом, предложенный метод анализа устойчивости позволил исследовать динамическую модель ТСР-сеансов, представленную системой нелинейных дифференциальных уравнений (1). В ходе решения этой задачи в аналитическом виде были получены условия обеспечения устойчивости ТСР-сеансов (2), (3), которые можно также построить и проанализировать геометрически в фазопараметрическом пространстве (Рис. 3, 4). Причем на характер решений (стационарных состояний и соответствующего поведения системы в окрестности этих состояний) влияют структурные и функциональные сетевые параметры (параметры ТСР/AQM-алгоритмов, положенных в основу исходной модели (1), а также топология сети, колебания интенсивности передаваемого трафика, многопоточность).

Полученные условия обеспечения устойчивости ТСР-сеансов могут быть использованы с целью решения задачи обоснованного выбора параметров ТСР/AQM-алгоритмов в ходе дальнейшей оптимизации ТСР-сеансов.

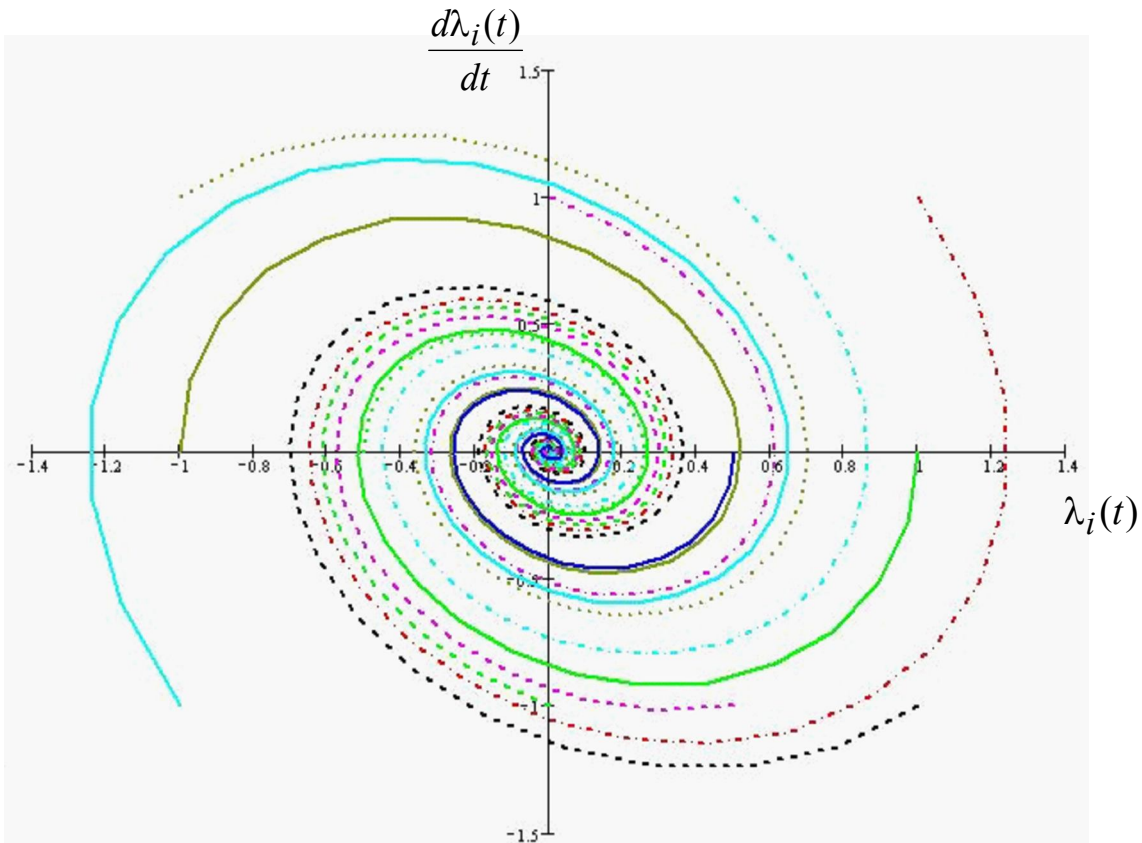


Рис. 4. Фазовий портрет системи ТСП-сеансов: рівноважна точка типу устойчивый фокус

Выводы. Анализ состояния и перспектив развития современных компьютерных сетей показал, что ключевыми аспектами при построении сетей NGN является их способность обслуживать разнородный по типу и требованиям трафик, гарантируя соответствие предоставленного уровня качества обслуживания запрашиваемому пользователями. Однако большинство средств управления трафиком, среди которых ТСП/AQM-алгоритмы, не отвечают требованиям по обеспечению QoS и сами нередко становятся причинами потери устойчивости компьютерных сетей. Установлено, что это обусловлено недостатками математических моделей и эвристических схем, положенных в основу этих алгоритмов.

В статье предложена математическая модель ТСП-сеансов, основанная на аппарате дифференциальных уравнений и теории массового обслуживания и представлена в пространстве состояний. К характерным свойствам предложенной модели относится учет динамичности процессов информационного обмена, а также изменения режимов передачи данных протокола ТСП. Также важным является возможность описания этих режимов согласно существующим и перспективным версиям протокола ТСП. Отличительной чертой модели является учет особенностей передачи одновременно нескольких ТСП-поток с разными классами обслуживания, что свойственно реальным мультисервисным компьютерным сетям. Кроме того, в рамках единой модели (1) формализованы как процессы передачи данных в соответствии с протоколом ТСП, так и процессы борьбы с перегрузками (AQM), что позволяет конечным устройствам оперативно реагировать на вероятные перегрузки в сети и, соответственно, избегать необоснованных потерь пакетов. Преимуществом предложенной модели ТСП-сеансов является возможность выбора типа AQM-алгоритма за счет использования различных моделей блокировки (отбрасывания) пакетов. Предложенная модель (1) в дальнейшем может быть использована для анализа устойчивости ТСП-сеансов и оптимизации выбора параметров ТСП/AQM-алгоритмов. Причем важность решения задачи обеспечения устойчивости продиктована необходимостью учета колебаний параметров сети (параметров ТСП/AQM-алгоритмов, флуктуаций трафика),

особенно в условиях, близких к перегрузкам.

Предложен метод анализа устойчивости TCP-сеансов в рамках динамической модели (1), основанный на теории бифуркаций. В отличие от классических методов математического анализа, позволяющих исследовать плавные непрерывные процессы, теория бифуркаций является универсальным инструментарием для исследования скачкообразных переходов, разрывов, внезапных качественных изменений. Использование данной теории при математическом описании компьютерных сетей открывает широкие возможности по обеспечению структурной и функциональной устойчивости по отношению к резким непредвиденным изменениям ее структуры (например, при выходе из строя сетевого элемента или целого участка сети), а также условиям функционирования (например, при скачкообразном увеличении интенсивности трафика, поступающего в сеть или изменении пропускной способности каналов связи). Метод основан на определении стационарных состояний (решений) системы (1) и последующем анализе поведения TCP-сеансов в окрестности этих состояний, среди которых наиболее важными являются устойчивый узел и устойчивый фокус. Применение предложенного метода позволило получить в аналитическом виде условия обеспечения устойчивости TCP-сеансов по отношению к незначительным колебаниям TCP/RED-параметров.

Література

1. Бакланов И. Г. NGN: принципы построения и организации / И. Г. Бакланов ; под ред. Ю. Н. Чернышова. – Москва : Эко-Трендз, 2008. – 400 с.
2. Стивенс У. Р. Протоколы TCP/IP. Практическое руководство / У. Р. Стивенс ; пер. с англ. и коммент. А. Ю. Глебовского. – Санкт-Петербург : «Невский диалект»-«БХВ-Петербург», 2003. – 672 с.
3. Postel J. Transmission control protocol. RFC 793 / J. Postel. – California, sept. 1981. – 85 p.
4. Вегешна Ш. Качество обслуживания в сетях IP / Ш. Вегешна ; пер. с англ. – Москва : Изд. дом «Вильямс», 2003. – 368 с.
5. Старкова Е. В. Динамическая модель TCP-сеанса при управлении длиной очереди с использованием механизма RED / Е. В. Старкова // Радиотехника. – 2009. – № 159. – С. 54-59.
6. Старкова Е. В. Математическая модель информационного обмена с использованием протокола TCP и механизма RED / Е. В. Старкова, К. В. Коробко, А. С. Билык // Науково-технічний симпозиум «Нові технології в телекомунікаціях», 2-5 лютого 2010 р.: Збірник тез. – К.: ДУІКТ, 2010. – С. 30-32.
7. Sanjeeva Athuraliya. REM: Active Queue Management / Sanjeeva Athuraliya, Victor N. Li, Steven H. Low, Qinghe Yin // IEEE Network. – 2001. – P. 121-132.
8. Крылов В. В. Теория телетрафика и ее приложения / В. В. Крылов, С. С. Самохвалова. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
9. Гельднер К. Нелинейные системы управления / К. Гельднер, С. Кубик ; пер. с нем. – Москва : Мир, 1987. – 368 с.
10. Арнольд В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. – [3-е изд., доп.]. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 128 с.
11. Арнольд В. И. Теория бифуркаций. Том 5 / В. И. Арнольд, В. С. Афраймовш, Ю. С. Ильяшенко, Л. П. Шильников. – Москва : ВИНТИ. – 1986. – 218 с.
12. Анищенко В. С. Устойчивость, бифуркации, катастрофы / В. С. Анищенко // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – № 6. – С. 105-109.

Дата надходження в редакцію: 07.08.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Ю. В. Кравченко