

УДК 621.391.31

МОДЕЛЬ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДЯМИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОКОМ- МУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ, ПРЕДСТАВЛЕННАЯ СЕТЬЮ ПЕТРИ



[Т.Н. КОВАЛЕНКО](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Розроблено математичну модель активного управління чергами в розподілених інфокомунікаційних системах на основі алгоритму раннього довільного виявлення RED. Проведено аналіз ефективності алгоритму при різних значеннях таких його параметрів, як показник граничної ймовірності, мінімальне та максимальне граничні значення середньої довжини черги.

A mathematical model of active queue management in distributed infocommunication systems on the basis of Random Early Detection algorithm is developed. Analysis of the algorithm efficiency is done at different values of its input parameters such as mark probability denominator, minimal and maximal threshold values of queue length.

Разработана математическая модель активного управления очередями в распределенных инфокоммуникационных системах на основе алгоритма раннего произвольного обнаружения RED. Проведен анализ эффективности данного алгоритма при различных значениях таких его исходных параметров, как показатель граничной вероятности, минимальное и максимальное пороговые значения средней длины очереди.

Введение

Стремительное развитие технологий виртуализации и распределенных облачных вычислений, рост популярности концепции "Все как услуга" (Everything as a service, EaaS), наблюдаемые в последние годы, выдвигает новые требования к телекоммуникационной инфраструктуре, обеспечивающей информационный обмен в этих сложных распределенных инфокоммуникационных системах. В настоящее время большинство подобных систем строится на основе сервис-ориентированного подхода [1-6]. К сожалению, широко применяемые на сегодняшний день в данных системах методы балансировки нагрузки основное внимание уделяют распределению задач между серверами сервис-провайдеров на основе статистических данных о загрузке серверов, не учитывая при этом характеристики транспортной телекоммуникационной сети (ТКС), обеспечивающей обмен данными между ними [7-11].

Одну из ключевых ролей в обеспечении качества обслуживания при предоставлении комплексных услуг, когда в данный процесс вовлечено несколько сервис-провайдеров, выполняют соглашения об уровне услуг (Service Level Agreement, SLA), что позволяет в той или иной степени обеспечить требуемые показатели QoS при предоставлении услуг [12]. В связи с этим возрастает значение методов управления всеми ресурсами системы, в том числе и ресурсами ТКС, на базе которых строятся распределенные инфокоммуникационные системы. К таким методам относятся механизмы управления очередями (буферный ресурс), средства распределения пропускной способности трактов передачи (канальный ресурс), механизмы управления

трафиком (информационный ресурс). При этом одним из наиболее важных являются методы активного управления очередями, которые позволяют предотвратить перегрузки в сети за счет превентивного отбрасывания пакетов из очереди [12-14]. Выбор алгоритма управления очередью является достаточно трудоемким, поскольку требует учета конкретных условий сети.

Стоит отметить, что эффективность большинства известных алгоритмов активного управления очередями все еще во многом зависит от административно задаваемых настроек параметров, связанных с измерением длины очереди и расчетом вероятности отбрасывания пакетов. В этой связи данная работа посвящена разработке математической модели активного управления очередями на узлах распределенной инфокоммуникационной системы в соответствии с алгоритмом произвольного раннего обнаружения (Random Early Detection, RED) и анализу эффективности данного алгоритма.

I. Обзор алгоритмов активного управления очередями

Основные задачи алгоритмов управления очередями – минимизация средней длины очереди при одновременном обеспечении высокого коэффициента использования канала, а также справедливое распределение буферного пространства между различными потоками данных. Схемы управления очередями различаются, в основном, критерием, по которому отбрасываются пакеты, и местом в очереди, откуда производится отбрасывание пакетов (начало или конец очереди). Наиболее простым критерием для отбрасывания пакетов является достижение очередью определенного порога, называемого максимальной длиной очереди.

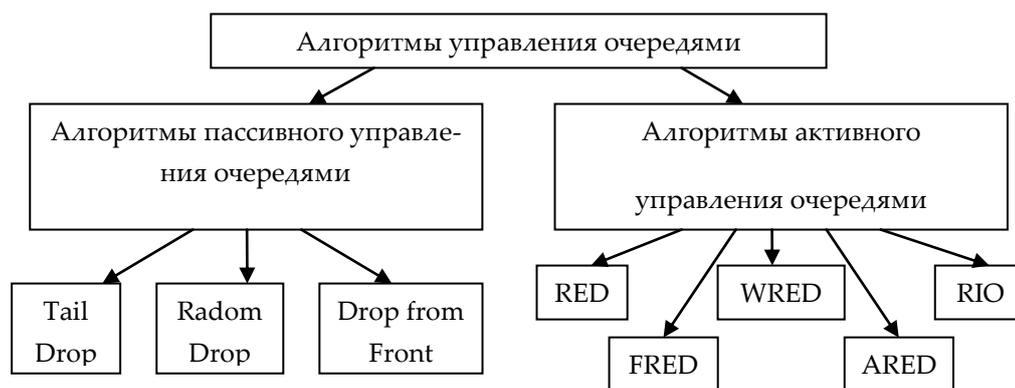


Рис. 1. Классификация алгоритмов управления очередями

Примером алгоритмов пассивного управления очередями (PQM) является алгоритм «отбрасывания хвоста» (Tail Drop), где трафик не разделяется по типам пакетов и вероятность отбрасывания каждого пакета одинакова. Когда очередь заполняется до некоторого заданного максимального значения, все вновь поступающие пакеты отбрасываются, пока очередь не освободится для поступления входящего трафика. Имеются альтернативные алгоритмы отбрасывания пакетов: Random Drop (отбрасывание случайно выбранного) и Drop from Front (отбрасывание первого пакета).

та в очереди). Алгоритмам PQM присущ ряд недостатков [12-14], для устранения которых используются алгоритмы активного управления очередями (AQM), обеспечивающие заблаговременное обнаружение перегрузки. Основными целями алгоритмов AQM являются:

- минимизация дрожания задержки пакетов путем контроля среднего размера очереди;
- предотвращение эффекта глобальной синхронизации TCP-трафика;
- обеспечение непредвзятого обслуживания трафика, характеризующегося кратковременными всплесками;
- строгое ограничение максимального среднего размера очереди.

Примерами алгоритмов AQM являются RED, WRED, flow WRED, ARED, SRED, RIO, CHOCe и другие [12-14]. AQM-алгоритмы могут быть классифицированы по критериям принятия решения об отбрасывании пакетов из очереди при возникновении перегрузки. Можно выделить 4 типа алгоритмов управления очередями [12]:

- AQM на основе средней длины очереди;
- AQM на основе уровня потери пакетов и эффективности использования канала;
- AQM на основе класса;
- AQM на основе теории контроля.

Наиболее распространенными и перспективными являются AQM-алгоритмы, базирующиеся на средней длине очереди, к которым относится исследуемый в данной работе алгоритм RED. Данный алгоритм имеет ряд параметров (минимальное и максимальное пороговые значения длины очереди, знаменатель граничной вероятности), изменение значений которых, очевидно, влияет на его функционирование. В связи с этим актуальной задачей является анализ эффективности работы алгоритма RED при различных значениях его параметров и разработка соответствующей математической модели, что позволит сформулировать рекомендации по обоснованному выбору значений параметров алгоритма RED для эффективного управления очередями в распределенных инфокоммуникационных системах.

II. Разработка математической модели активного управления очередями с использованием алгоритма RED

Алгоритм раннего произвольного обнаружения RED базируется на вычислении среднего размера очереди и вычислении вероятности отбрасывания пакетов. При определении вероятности отбрасывания пакетов механизм RED вычисляет не текущий, а экспоненциально взвешенный средний размер очереди. Текущий средний размер определяется на основании предыдущего среднего и текущего действительного размера. Использование механизмом RED среднего размера очереди обусловлено стремлением реагировать только на продолжительную перегрузку сети и «не замечать» моментальных всплесков трафика. Средний размер очереди avg вычисляется по формуле [12,15]:

$$avg = (1 - W) \cdot avg_old + W \cdot q, \quad (1)$$

где W – это весовой коэффициент очереди, $W = 2^{-n}$; n – экспоненциальный весовой коэффициент; q – текущий размер очереди; avg_old – значение средней длины очереди на предыдущем шаге измерений.

Вероятность отбрасывания пакетов P_a представляет собой функцию, линейно зависящую от среднего размера очереди (рис. 2). Помимо этого, данная функция зависит также от минимального порогового значения **min_th**, максимального порогового значения **max_th** и знаменателя граничной вероятности **max_p** (mark probability denominator), определяющего часть отбрасываемых пакетов при достижении средним размером очереди максимального порогового значения. Вероятность отбрасывания пакетов рассчитывается по формуле:

$$P_a = \begin{cases} 0, & \text{если } avg < \mathbf{min_th}; \\ \mathbf{max_p} \cdot \frac{avg - \mathbf{min_th}}{\mathbf{max_th} - \mathbf{min_th}}, & \text{если } \mathbf{min_th} \leq avg < \mathbf{max_th}; \\ 1, & \text{если } \mathbf{max_th} \leq avg. \end{cases} \quad (2)$$

Когда средний размер очереди превышает минимальное пороговое значение, механизм RED начинает отбрасывать пакеты. Интенсивность отбрасывания пакетов возрастает прямо пропорционально возрастанию среднего размера очереди до тех пор, пока он не достигнет максимального порогового значения. Когда средний размер очереди превышает максимальное пороговое значение, механизм RED отбрасывает все пакеты, предназначенные для постановки в очередь.



Рис. 2. Зависимость вероятности отбрасывания пакетов механизмом RED от средней длины очереди

Для разработки модели управления очередями в соответствии с описанным алгоритмом в работе использован математический аппарат раскрашенных сетей Петри (Coloured Petri Nets, CPN) [16-20]. Данный математический аппарат позволяет моделировать сложные системы путем их наглядного графического представления в виде ориентированного графа. Временные CPN, используемые в данной работе, да-

ют возможность разрабатывать модели с учетом как структурных, так и функциональных свойств исследуемой системы. Кроме того, сети Петри имеют набор средств анализа полученных моделей, в том числе и путем имитационного моделирования с использованием специализированных программных средств.

Предлагаемая модель является отдельным CPN модулем, который предлагается включить в состав иерархической модели распределенной инфокоммуникационной системы с сервис-ориентированной архитектурой (SOA), описанной ранее в работе [21]. Графическое представление разработанной модели показано на рис. 3.

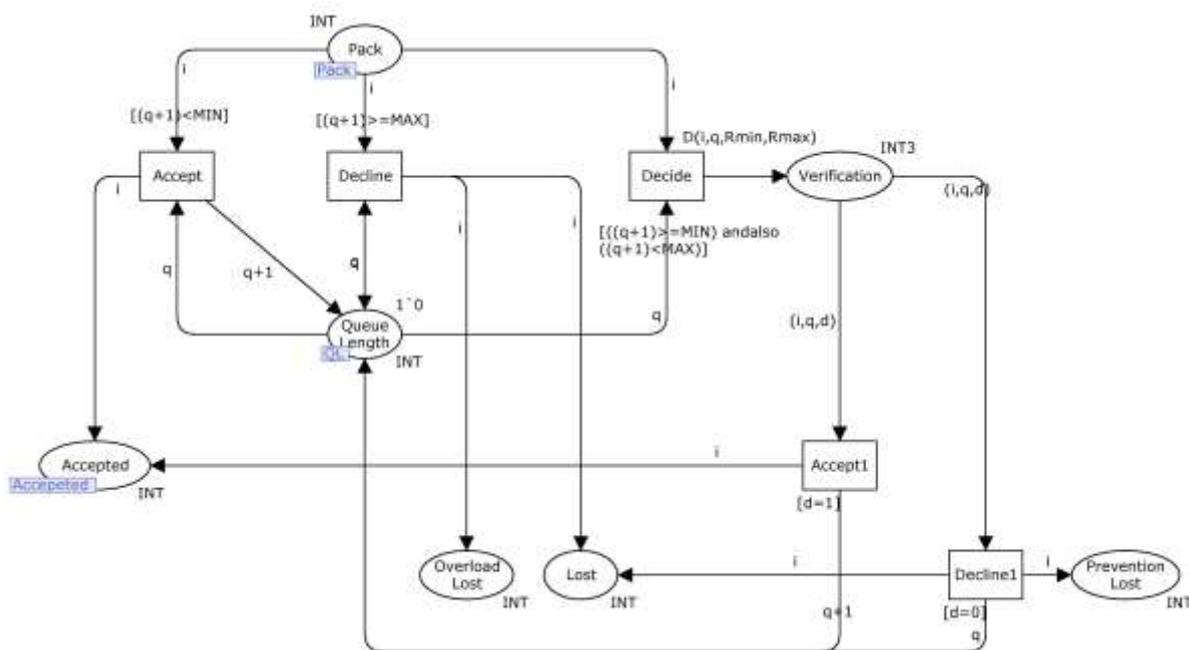


Рис. 3. Модель активного управления очередью с использованием алгоритма RED, представленная сетью Петри

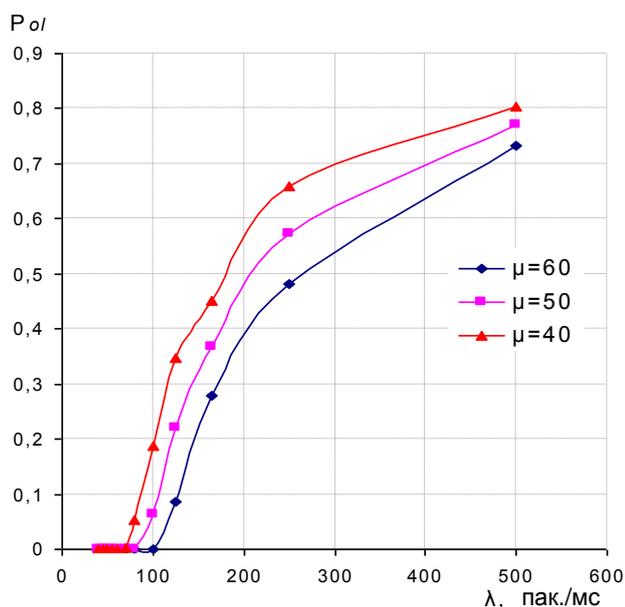
Приходящие на вход узла распределенной инфокоммуникационной системы пакеты (позиция "Pack") обрабатываются в зависимости от текущего значения средней длины очереди и установленных параметров минимального и максимального пороговых значений (MIN и MAX соответственно), а также знаменателя граничной вероятности $\max P$. Каждый вновь прибывший $(q+1)$ -й пакет становится в очередь (переход "Ассерпт"), если $q \leq MIN$, и текущее значение длины очереди увеличивается на 1 (позиция "Queue Length"). Если $q > MAX$, пакет отбрасывается (переход "Decline"), и длина очереди не изменяется. Если значение длины очереди находится в пределах $MIN < q \leq MAX$, то рассчитывается вероятность отбрасывания пакета $P(q)$ в соответствии с формулой (2) и принимается решение (переход "Decide") принять пакет и поставить его в очередь (переход "Accept1"), или отбросить пакет (переход "Decline1"). Позиции "Accepted", "Prevention Lost" и "Overload Lost" используются для сбора статистики о количестве принятых пакетов и пакетов, отброшенных с целью предотвращения перегрузки и в результате переполнения буфера соответственно. Статистика общего числа отброшенных пакетов отображается разметкой позиции "Lost".

III. Анализ эффективности AQM-алгоритма RED

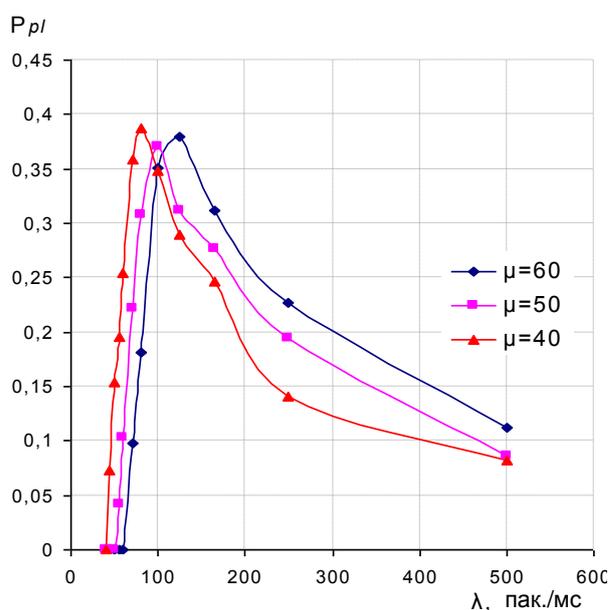
Исследование эффективности работы алгоритма RED проводилось путем имитационного моделирования с использованием разработанной модели, представленной в виде раскрашенной временной сети Петри и программного пакета CPN Tools. Исходные данные при проведении моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные моделирования

Параметр	Значение
Интенсивность поступления пакетов λ , пак./мс	40...500
Интервалы времени между поступающими пакетами	Случайные, подчиняющиеся гамма-распределению
Интенсивность обслуживания пакетов μ , пак./мс	40...60
Время обслуживания пакета на узле	Случайное, подчиняющееся гамма-распределению
Минимальное пороговое значение длины очереди MIN , пак.	80...145
Максимальное пороговое значение длины очереди MAX , пак.	100...175
Знаменатель граничной вероятности $\max P$	0.1...1.0



а) потери в результате переполнения буфера



б) потери в результате превентивного отбрасывания пакетов

Рис. 4. Графики зависимости вероятности потери пакетов от интенсивности входного трафика при различных значениях производительности сетевого узла

На рис. 4 показаны графики зависимости вероятности потери пакетов в результате переполнения буфера (рис. 4, а) и превентивного отбрасывания пакетов (рис. 4, б) от интенсивности входного трафика λ при различной производительности сетевого узла μ . Потери в результате переполнения буфера возникают, если значение интенсивности трафика, поступающего на узел, превышает некоторое пороговое значение, которое зависит от производительности узла μ и может быть определено из графиков, приведенных на рис. 4, а. Так, при производительности узла $\mu = 60$ пак./мс. пороговое значение интенсивности входного трафика, при котором превентивное отбрасывание пакетов уже не в состоянии предотвратить постоянное переполнение буфера, составляет $\lambda = 100$ пак./мс. При превышении этого значения вероятность потери пакетов в результате перегрузки резко возрастает с ростом интенсивности входного трафика.

Вероятность потери пакетов в результате превентивного отбрасывания показывает эффективность работы алгоритма RED. Из графиков, приведенных на рис. 4, б, видно, что вероятность потерь превентивного отбрасывания пакетов достигает максимального значения 0,37-0,4 при интенсивности входного трафика в 2 раза большей, чем интенсивность обслуживания. Таким образом, действие алгоритма наиболее эффективно при $\lambda < 2\mu$, при этом потери пакетов возникают вследствие превентивного отбрасывания. Когда же $\lambda > 2\mu$, превентивно отброшенных пакетов недостаточно для предотвращения перегрузки, и возникают потери в результате действия механизма «отбрасывания хвоста».

Результаты исследования влияния минимального порогового значения длины очереди MIN на эффективность алгоритма RED представлены на рис. 5.

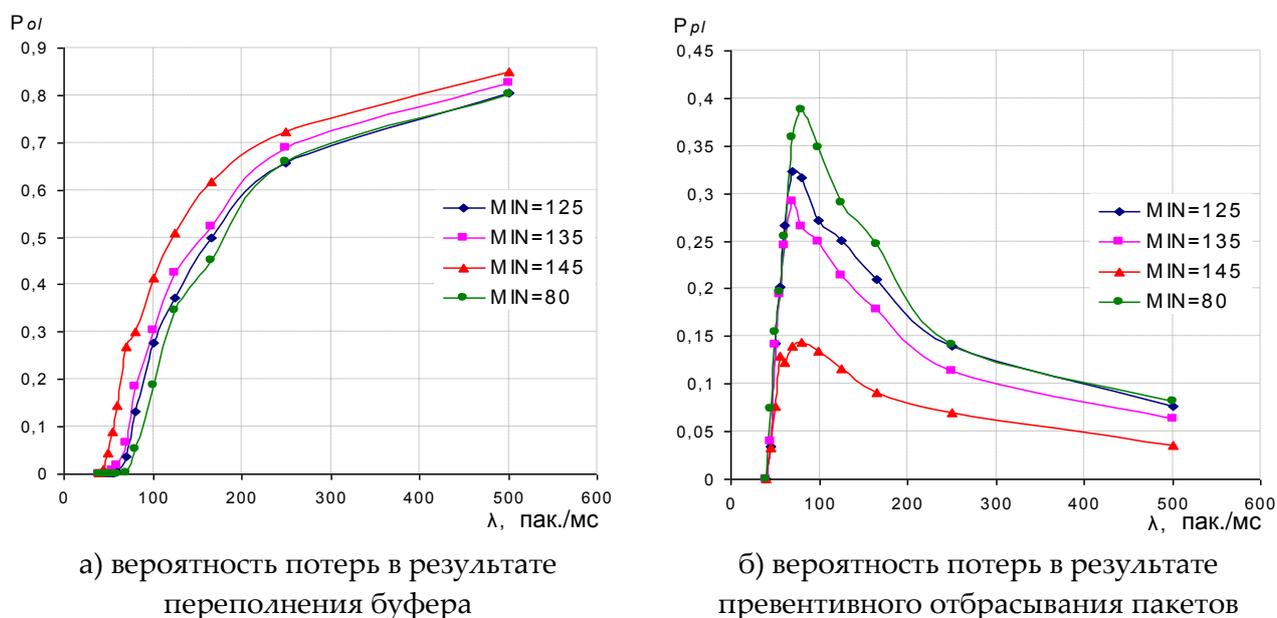
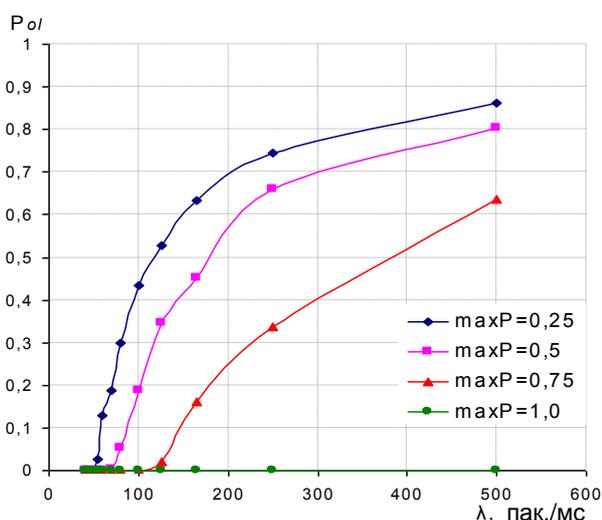


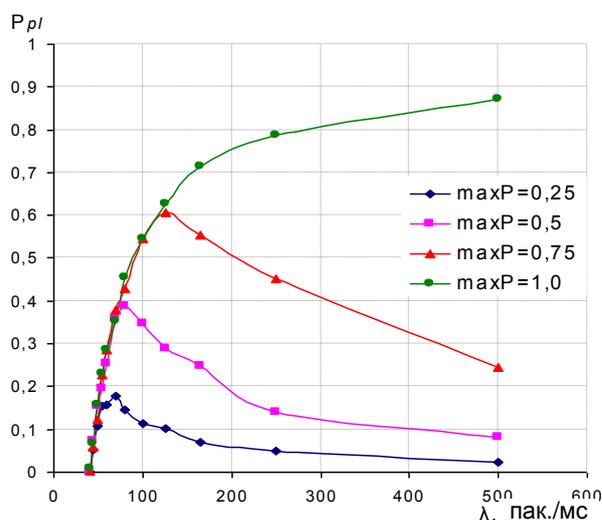
Рис. 5. Графики зависимости вероятности потери пакетов от интенсивности входного трафика при различных минимальных пороговых значениях длины очереди

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что увеличение минимального порогового значения приводит к возрастанию вероятности переполнения буфера, что свидетельствует о снижении эффективности работы алгоритм RED. Как показали результаты имитационного моделирования, к снижению эффективности алгоритма RED приводит также уменьшение максимального порогового значения длины очереди MAX.

Влияние значения показателя граничной вероятности $\max P$ на эффективность управления очередями показано на рис. 6. Из представленных графиков видно, что чем больше значение показателя граничной вероятности $\max P$, тем эффективнее функционирует алгоритм RED, и пакеты отбрасываются заблаговременно, что позволяет избежать переполнения буфера и оперативно реагировать на наступление перегрузки сети.



а) потери в результате переполнения буфера



б) потери в результате превентивного отбрасывания пакетов

Рис. 6. Графики зависимости вероятности потери пакетов от интенсивности входного трафика при различных значениях показателя граничной вероятности

Выводы

Популярные на сегодняшний день подходы к построению распределенных инфокоммуникационных систем требуют уделять особое внимание методам обеспечения гарантированного качества обслуживания. Поскольку предоставляемые в таких системах комплексные услуги предполагают вовлечение в процесс обслуживания ресурсов нескольких сервис-провайдеров, ключевыми моментами при построении распределенных инфокоммуникационных систем является заключение договоров SLA и совершенствование методов управления ресурсами системы, позволяющих гарантировать оговоренные в договоре значения показателей QoS. В связи с

этим особое внимание уделяется задачам управления сетевыми ресурсами, которые решаются в том числе с помощью методов активного управления очередями.

В работе представлена математическая модель активного управления очередями в распределенной инфокоммуникационной системе с использованием алгоритма раннего произвольного обнаружения RED. Для разработки данной модели был применен аппарат раскрашенных сетей Петри. Проведен анализ эффективности алгоритма RED при различных значениях таких его исходных параметров, как показатель граничной вероятности, минимальное и максимальное пороговые значения длины очереди. Полученные в результате проведенного моделирования зависимости позволили сформулировать рекомендации по выбору значений данных параметров при различной интенсивности трафика и производительности узлов распределенной инфокоммуникационной системы.

Так было установлено, что алгоритм RED достаточно эффективно предотвращает перегрузку при интенсивности входного трафика $\lambda < 2\mu$, однако пороговое значение λ существенно зависит не только от производительности маршрутизатора, но и от параметров алгоритма RED. Например, при увеличении значения граничной вероятности $\max P$ от 0,5 до 0,75, пороговое значение интенсивности входного трафика, при котором алгоритм RED еще позволяет избежать переполнения буферов, возрастает от $80 \cdot 10^3$ пак./мс до $130 \cdot 10^3$ пак./мс. Значение минимального порогового значения длины очереди в большей степени влияет на вероятность превентивного отбрасывания пакетов. Так, увеличение данного параметра с 135 до 145 пакетов позволяет снизить вероятность превентивного отбрасывания пакетов вдвое (с 0,3 до 0,15).

Список литературы:

1. Пузыня С., Пырлина И. Корпоративная архитектура и SOA [Электронный ресурс] // Открытые системы. – 2010, №2. – Режим доступа к статье: <http://www.osp.ru/os/2010/02/13001450/>.
2. Working smarter with a Smart SOA foundation [Электронный ресурс]. – режим доступа: ftp://public.dhe.ibm.com/software/solutions/pdfs/7946_Working_smarter_Brochure.pdf
3. Ed Ort. Service-Oriented Architecture and Web Services: Concepts, Technologies, and Tools [Электронный ресурс]. – Режим доступа к материалам: <http://java.sun.com/developer/technicalArticles/WebServices/soa2/SOATerms.html>.
4. HP SOA Systinet and JBoss Enterprise SOA Platform. Service-oriented architecture infrastructure and governance solution [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://h20195.www2.hp.com/V2/GetPDF.aspx/4AA2-6915ENW.pdf>.
5. Oracle White Paper – Oracle SOA Suite 11g [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oracle.com/us/technologies/soa/soa-suite/oracle-soa-suite-11g-198758.pdf>.
6. Microsoft and SOA Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа к материалам: http://www.soa.com/solutions/microsoft/microsoft_and_soa_software/.
7. Nicolai M. Josuttis. SOA in Practice: The Art of Distributed System Design (Theory in Practice). – O'Reilly Media, 2007. – 352 p.
8. Хойссер М. Тестирование SOA: примеры [Электронный ресурс] // Директор информационной службы. – 2008, № 12. – Режим доступа к статье: <http://www.osp.ru/cio/2008/12/5585238/>.

9. Кузнецов С. SOA с гарантией качества [Электронный ресурс] // Открытые системы. – 2008, № 07. – Режим доступа к статье: <http://www.osp.ru/os/2008/07/5479587/>.
10. Слитер Б. 5 проблем SOA [Электронный ресурс] // Computerworld Россия. – 2004. № 38. – Режим доступа к статье: <http://www.osp.ru/cw/2004/38/81416/>.
11. Дубова Н. SOA: подходы к реализации [Электронный ресурс] // Открытые системы. – 2004, № 06. – Режим доступа к статье: <http://www.osp.ru/os/2004/06/184450/#top>.
12. Лемешко О.В. Багатоканальний електров'язок та телекомунікаційні технології: Підручник. У 2-х ч. Ч.1 / О.В. Лемешко, В.А. Лошаков, В.В. Поповський та ін.; за заг. ред. проф. В.В. Поповського. – Х.: ТОВ «Компанія СМІТ», 2010. – 470 с.
13. Вегешна Ш. Качество обслуживания в сетях IP: пер. с англ. – М. : Вильямс, 2003. – 368 с.
14. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Е. А. Кучерявый. – СПб. : Наука и техника, 2004. – 336 с.
15. An active queue management scheme for Internet congestion control and its application to differentiated services / L. Su and J.C. Hou, The Ohio State University, Columbus, OH, January 2000. – 25 p.
16. Jensen K. Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use. / K Jensen – Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1996. – 234 p.
17. Control and Adaptation in Telecommunication Systems: Mathematical Foundations // by V. Popovskij, A. Barkalov, L. Titarenko. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. – 564 p.
18. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В.В. Поповський, С.О. Сабурова, В.Ф. Олійник, Ю.І. Лосєв, Д.В. Агєєв та ін.: За загальною редакцією В.В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
19. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. / М.В. Горбатова, В.Л. Торохов, В.Н. Четвериков; Под ред. В.А. Горбатова. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
20. Лескин А.А. Сети Петри в моделировании и управлении / А.А. Лескин – Л.: Наука, 1989. – 135 с.
21. Kovalenko T.N. Analysis of productivity of distributed systems with service oriented architecture under conditions of limited link and buffer resources of telecommunication network [Электронный ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2012. – № 1 (6). – С. 3 – 11. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_kovalenko_petri.pdf.