

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ МАРШРУТИЗАЦИИ (AQM) В ETHERNET

М.П. ТУМАНОВ, профессор МИЭМ НИУ ВШЭ, канд. техн. наук,
С.Р. АБДУЛЛИН, доц. каф. высшей математики МГУЛ

miketum@yandex.ru, mai-sal@yandex.ru

Московский институт электроники и математики Высшей школы экономики,
123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34
ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

Алгоритмы управления очередями маршрутизаторов – современная и актуальная задача, возникающая при построении информационных систем. В работах [1–13] рассмотрены основные современные подходы управления маршрутизацией. Построены модели в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений с переменным запаздыванием. Исследованы общие свойства этих моделей и соответствующих решений дифференциальных уравнений. Выбор параметров буферирования может существенно повлиять не только на быстрдействие канала связи, но и на другие параметры передачи, среди которых очень важным является стабильность скорости. В распределённых системах автоматического управления, в частности, это приводит к потере устойчивости контура управления и/или существенному ухудшению показателей качества регулирования управления. В практических случаях часто наблюдаются периодические колебания скорости передачи данных, которые недостаточно исследованы, но существенно влияют на работу распределённой системы. Не все вопросы исследованы в достаточной степени, особенно применительно к распределённым системам автоматики и управления, где стоит задача не только доставки информации, но и жёсткой временной синхронизации. В этом контексте особый интерес представляют случаи, когда возникают режимы периодически меняющегося в широких пределах запаздывания при передаче данных. С математической точки зрения имеется система нелинейных дифференциальных уравнений с переменным запаздыванием частного вида периодически меняющимся. В общем случае эта теория недостаточно развита, в статье промоделированы некоторые частные случаи. Именно эта тема рассмотрена в нашей статье, в которой показано, что режим периодически меняющегося запаздывания естественно возникает в таких системах.

Ключевые слова: система с запаздыванием, переменное запаздывание, сетевой маршрутизатор, IP-пакет, Fluid-based модель RED.

Запаздывание в сети Ethernet

Основной особенностью систем управления с наличием сетевого компонента Ethernet является то, что этот компонент вносит дополнительное запаздывание, влияющее на качество переходных процессов. Таким образом, эти системы являются системами с запаздыванием. Классы сетевого QoS, задающие ограничения для значений рабочих характеристик сети, приведены в таблице [1].

Таким образом, не гарантируется время задержки менее 0,1 с в сети Ethernet даже в рамках использования сервиса QoS. Такое реальное положение дел, и оно означает, что при наличии сетевой компоненты трудно управлять объектом с характерной постоянной времени $\sim 0,1$ с и менее.

Известны общепринятые методы борьбы с запаздыванием, в рассматриваемом случае эффективнее всего оказывается метод буферирования, но он приводит к увеличению постоянного запаздывания. К сожалению, известные методы адаптации

не учитывают эффект резонанса, который может возникать при периодически меняющемся запаздывании.

В [2] было показано, что переменное периодическое запаздывание может приводить к явлению резонанса, при котором замкнутая система становится неустойчивой, даже если она устойчива при любом постоянном запаздывании. С другой стороны, показано, что использование модели запаздывания, даже не очень точной, обычно позволяет существенно улучшить динамику САУ. Таким образом, встаёт задача оценки переменного запаздывания в реальном времени, возможно, даже и с не очень высокой точностью. Сетевые сервисы времени и часы реального времени компьютеров тут малопригодны в силу своей низкой точности и надёжности.

В реальных системах автоматического управления с сетевой компонентой такие запаздывания различного уровня возникают регулярно. Это связано с особенностями функционирования протокола TCP/IP при прохож-

Классы сетевого QoS
Network QoS classes

Характеристики доставки IP-пакетов	Классы качества передачи информационных потоков QoS (ITU-T Recommendation Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. 2006)					
	0	1	2	3	4	5
Задержка доставки IP-пакета – IPTD	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1000 мс	Не опр.
Вариация задержки доставки IP-пакета – IPDV	50 мс	50 мс	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Доля потерянных IP-пакетов – IPLR	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	Не опр.
Доля переданных с ошибкой IP-пакетов – IPER	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	Не опр.

дении сетевых пакетов через маршрутизаторы. Эти запаздывания исследованы недостаточно.

Их исследование необходимо для создания алгоритмов идентификации запаздывания и адаптации к запаздыванию.

Моделирование переменного запаздывания в среде Matlab проведено с использованием математических моделей RED как наиболее распространенных в настоящее время. Они позволяют естественным феноменологическим образом описать все процессы, происходящие при маршрутизации протокола TCP/IP.

Ниже приведена известная ([3], Fluid-based модель RED) система дифференциальных уравнений, описывающая динамику очередей сетевого маршрутизатора. Задержки передачи связаны с величинами очередей и интенсивностями потери пакетов. Система нелинейная и с запаздыванием.

$$\frac{dW}{dt} = C - \frac{1}{2} W(t) \frac{W(t - R(t))}{p - R(t)}, \quad (1)$$

$$dq(t) / dt = W(t)N(t)/R(t) - C, \quad (2)$$

где $W(t)$ – ожидаемый размер окна TCP (пакетов),

$q(t)$ – ожидаемая длина очереди (пакетов),

$R(t)$ – время возврата подтверждения:
 $R(t) = q(t)/C + Td$,

C – пропускная способность канала (пакетов/с),

Td – задержка (в общем случае, случайная) передачи пакета (с),

$N(t)$ – фактор нагрузки (число одновременных TCP сессий),

$p(q(t))$ – управляющий фактор, вид функции определяется используемой маршрутизатором дисциплиной обслуживания очереди, $p(q(t))$ из отрезка $[0, 1]$.

Данный график представляет собой зависимость вероятности отбрасывания пакета в зависимости от длины очереди и определяет вероятностный характер модели RED. Виды подобных графиков обсуждаются в литературе [3–9].

В статье не обсуждаются эти подробности, но при моделировании были рассмотрены различные варианты, обсуждение которых заслуживает отдельной публикации.

Первое уравнение системы (1) описывает адаптивный характер управления окном TCP. Второе уравнение системы (2) описывает очередь маршрутизатора. Таким образом, система (1, 2) является нелинейной динамической системой с переменным запаздыванием.

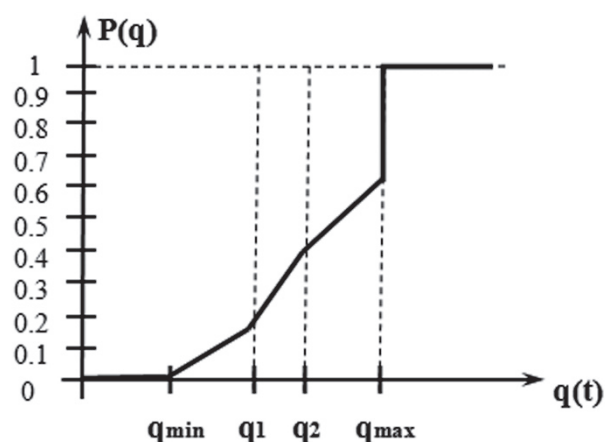


Рис. 1. Схема алгоритма RED маршрутизации
Fig. 1. Scheme of the RED routing algorithm

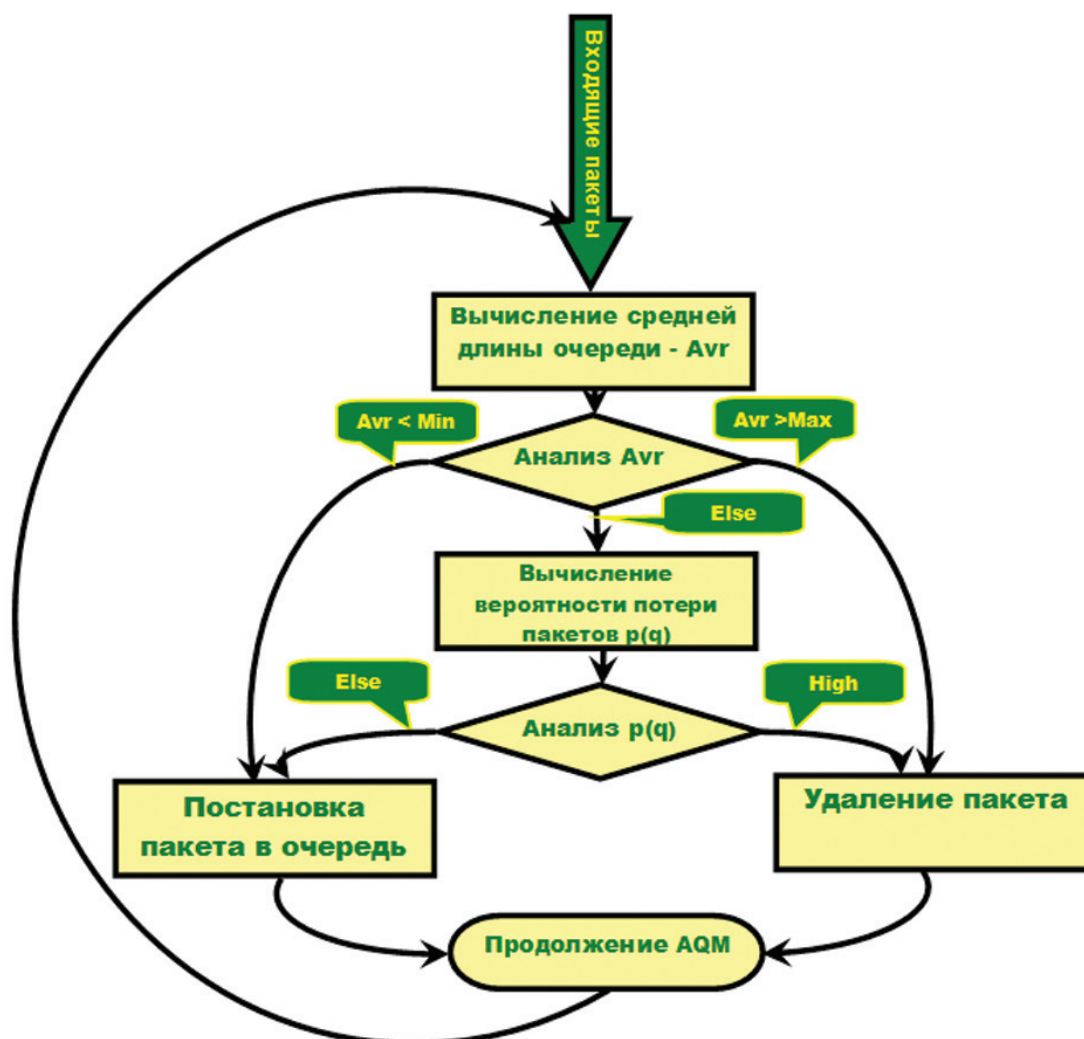


Рис. 2. Алгоритм RED маршрутизации

Fig. 2. RED routing algorithm

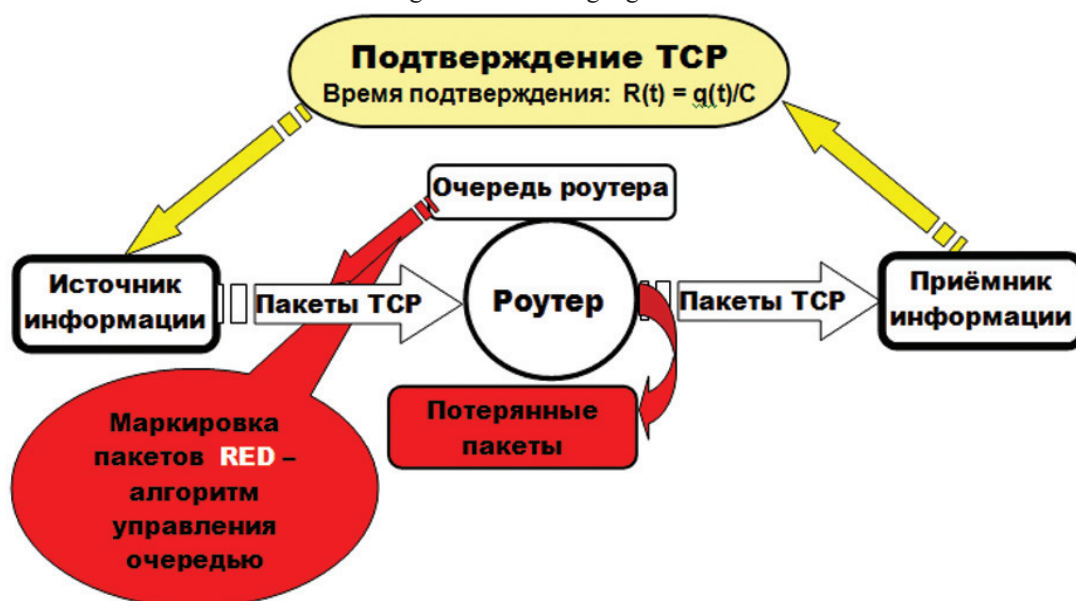


Рис. 3. Блок-схема 1. Схема моделирования переменного запаздывания в Matlab

Fig. 3. Block diagram 1. Diagram modeling the variable delay in Matlab

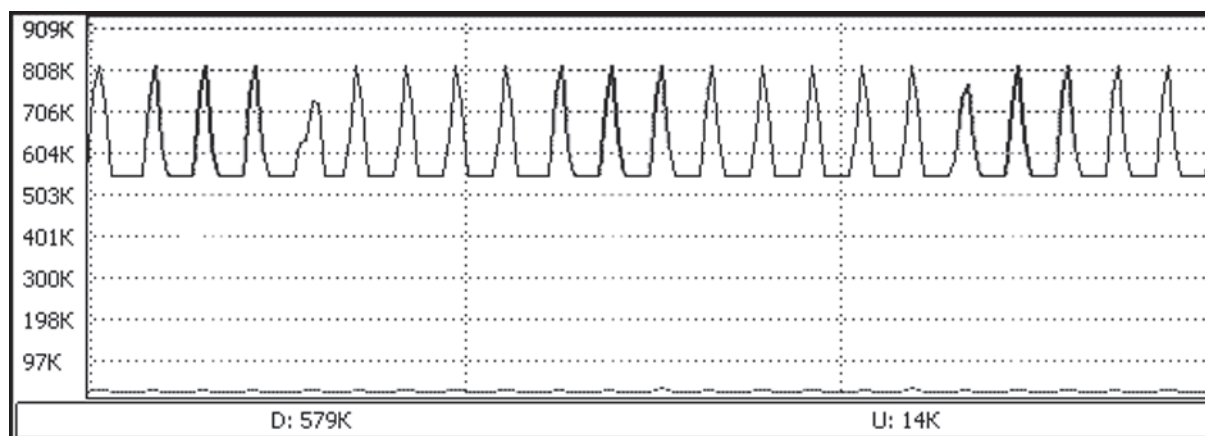


Рис. 4. Экспериментально полученные данные при передаче большого файла Интернет
Fig. 4. The experimental data for transferring large files online

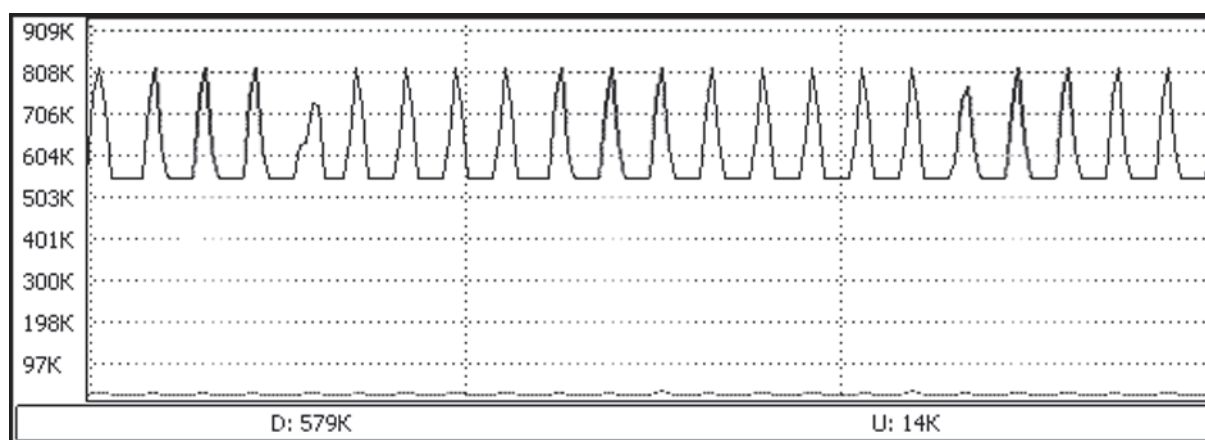


Рис. 5. Экспериментально полученные данные при передаче большого файла, локальная сеть
Fig. 5. The experimental data for large file transfers, LAN

ем. Для таких систем характерным является режим автоколебаний.

Моделирование показывает, что важнейшей является зависимость от времени $R(t)$ (времени возврата подтверждения). При этом замкнутая САУ оказывается обладающей переменным запаздыванием.

Наиболее интересным является режим повышенного джиттера, то есть, периодически меняющегося запаздывания. Этот режим соответствует автоколебаниям в замкнутой САУ.

Критика ранее достигнутых результатов [3–13]:

1. Жидкостная (Fluid-based) [3] модель RED AQM (1–2) аддитивно-мультипликативная, обладающая существенными нелинейностями, но устойчивость везде оценивается после линеаризации в окрестности установившегося статического режима.

2. Моделирование показывает, что важнейшей является зависимость от времени $R(t)$ (времени возврата подтверждения). При этом замкнутая САУ оказывается обладающей переменным запаздыванием, что не учитывается.

3. Наиболее интересным является режим повышенного джиттера, то есть периодически меняющегося запаздывания. Этот режим соответствует автоколебаниям в замкнутой САУ. Но параметры автоколебаний не исследуются.

4. Очевидно, что вследствие нелинейности, система может работать во многих различных режимах, в зависимости от параметров. Границы этих режимов не исследованы.

5. Не исследованы случайные факторы, в частности посторонний трафик.

6. Единственным исключением являются [7, 9], где использован подход теории

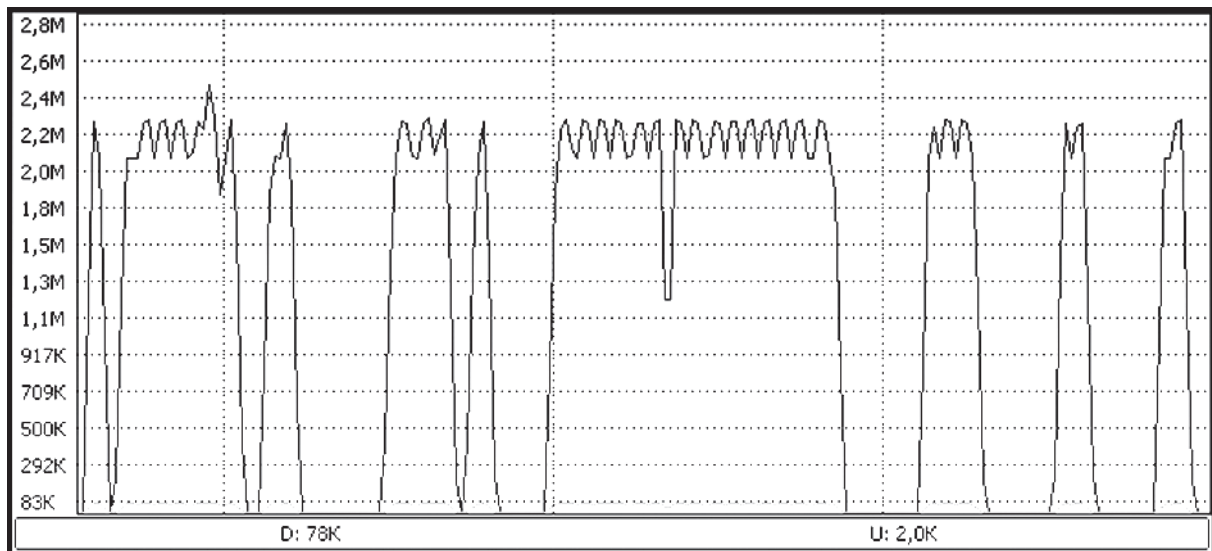


Рис. 6. Экспериментально полученные данные при передаче большого файла 100 Мб Интернет.

Fig. 6. The experimental data for transferring a large 100 MB file through the Internet

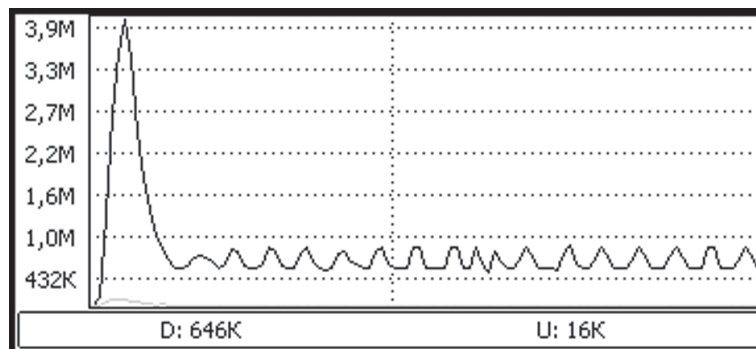


Рис. 7. Экспериментально полученные данные при передаче потокового видео YouTube: время задержки распространения – $T_d = 0,25$ с; число потоков – $N = 100$, пропускная способность канала – $C = 3750$ пакетов/с

Fig. 7. Experimental data obtained during the transfer of streaming YouTube videos: propagation delay time – $T_d = 0,25$ с; the number of streams – $N = 100$, the channel capacity – $C = 3750$ packets / second

абсолютной устойчивости (гиперустойчивости).

Вывод: целесообразно промоделировать всю нелинейную систему в различных режимах нагрузки, что и проведено в ходе исследования.

Проведено моделирование уравнений (1–2) в среде Matlab-Simulink и показано, что результаты моделирования очень похожи на реально снятые в ходе эксперимента кривые изменения запаздывания в сетевом компоненте.

Экспериментальные данные

Были сняты экспериментальные данные в различных режимах работы сети при

передаче различных данных для того, чтобы сравнить предсказанные моделью результаты с экспериментальными. Ниже приведены некоторые характерные графики (измерено в реальных сетях) для различных условий эксплуатации сети и результаты моделирования.

Очевидное наличие случая периодического запаздывания делает актуальным исследование влияния периодически меняющегося запаздывания на показатели устойчивости и качества распределённых САУ.

Выводы по результатам моделирования AQM RED:

1. Во многих случаях наблюдаются режимы с периодически меняющимся

запаздыванием распространения сигнала (джиттером).

2. Эти режимы являются типичными и возникают при нормальных (не критических) условиях функционирования роутера.

3. Величина запаздывания может меняться значительно (в разы).

4. Характерные периоды изменения запаздывания имеют порядок единиц секунд.

5. При использовании сетей TCP при передаче сигналов реального времени в системах автоматики целесообразно учитывать имеющийся (возможный) джиттер.

6. Форма колебаний – пилообразная или близкая к гармоническим.

Библиографический список/ References

1. M. Christiansen, K. Jeffay, D. Ott, and F.D. Smith, «Tuning RED for web traffic,» in Proceedings of ACM/SIGCOMM, 2000.
2. Martin May, Thomas Bonald, and Jean-Chrysostome Bolot, «Analytic Evaluation of RED Performance,» in Proc. of IEEE/INFOCOM, 2000.
3. Teunis J. Ott, T. V. Lakshman, and L. H. Wong, «SRED: Stabilized RED,» in Proceedings of IEEE/INFOCOM, 1999.
4. W. Feng, D. Kandlur, D. Saha, K. Shin, «Blue: A New Class of Active Queue Management Algorithms,» Tech. Rep., UM CSE-TR-387-99, 1999.
5. Victor Firoiu and Marty Borden, «A Study of Active Queue for Congestion Control,» in Proceedings of IEEE/INFOCOM, 2000.
6. F. Kelly, «Mathematical modelling of the Internet» in Mathematics Unlimited - 2001 and Beyond, 2000.
7. C. V. Hollot, Vishal Misra, Don Towsley, and Wei-Bo Gong, «On Designing Improved Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows,» in Proceedings of IEEE/INFOCOM, April 2001.
8. Firoiu V., Borden M. A Study of Active Queue Management for Congestion Control // Proceedings of IEEE/INFOCOM, 2000.
9. Misra V., Wei-Bo Gong, Towsley D. Fluid-based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED // Proceedings of ACM/SIGCOMM. 2000.
10. Hollot C.V., Misra V., Towsley D., Wei-Bo Gong. Analysis and Design of Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows // IEEE Transactions on automatic control. – 2002. – Vol. 47, No.6.
11. Еремин, Е.Л. Синтез робастного контроллера очереди AQM маршрутизатора / Е.Л. Еремин, С.С. Охотников, Д.А. Теличенко // Вестник ТОГУ. Информатика, вычислительная техника и управление. – 2010. – № 4 (19). – С. 13–22.
11. Eremin E.L., Ohotnikov S.S., Telichenko D.A. *Sintez robastnogo kontrollera ocheredi AQM marshrutizatora* [Synthesis of the robust control of turn of AQM of a router] Vestnik TOGU. 2010. № 4 (19). pp. 13-22.
12. Охотников, С.С. Обеспечение устойчивости TCP сессий маршрутизаторов RED / С.С. Охотников // Системы передачи данных, 2007. – № 2(14). – С. 2–21.
12. Ohotnikov S.S. *Obespechenie ustoychivosti TCP sessiy marshrutizatorov RED* [Ensuring stability of TCP of sessions of routers of RED]. Sistemy peredachi dannyh, 2007, №2(14), p. 2-21
13. Еремин, Е.Л. Гибридная система управления TCP потоками / Е.Л. Еремин, С.С. Охотников, Д.А. Теличенко // ИСУ. 2011. – № 1 (27). – С. 109–114.
13. Ohotnikov S.S., Eremin E.L., Telichenko D.A. *Gibridnaya sistema upravleniya TCP potokami* [Hybrid control system of TCP of streams] ISU. 2011. № 1 (27). pp. 109-114

NONLINEAR ROUTING SYSTEM (AQM) IN THE ETHERNET

Tumanov M.P., Prof. MIEM HSE, Ph.D. (Tech.); Abdullin S.R., Assoc. Prof. MSFU

miketum@yandex.ru, mai-sal@yandex.ru

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics Higher School of Economics, 123458, Moscow, st. Tallinn, 34
Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moscow reg., Russia

Roters queue management algorithms are a modern and relevant challenge in building the information systems. In [1-13] the main modern approaches of the routing control are discussed.

The models are constructed in the form of a system of nonlinear differential equations with a variable delay. The general properties of these models and the corresponding solutions of differential equations have been investigated. The choice of parameters buffering can significantly affect not only the performance of the communication channel, but also other transmission parameters, among which one of the very important is the speed stability. In the distributed control systems, in particular, this leads to the loss of stability of the control loop and/or significant deterioration in the control quality. In practical cases, there often are periodic fluctuations in the data rate, which are insufficiently investigated, but affect the operation of the distributed system significantly. Not all issues are investigated sufficiently, particularly with respect to distributed systems automation and control, where the important things are not only the task of information delivery, but also hard timing. In this context, the cases when there is a periodically changing regimes in a wide range of delay when transferring data are of particular interest. From a mathematical point of view there is a system of nonlinear differential equations with variable private delay. In the general case, this theory is not developed, but some particular cases are looked into in the article. The regime of periodically changing delay arises naturally in such systems.

Keywords: delay system, variable latency, network router, IP-packet Fluid-based model RED.