

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ МАРШРУТИЗАЦИИ (AQM)

доц. Туманов М.П. (МИЭМ)

*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 [1]:

Таблица 1

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.

Таким образом, НЕ ГАРАНТИРУЕТСЯ время задержки менее 0.1с в сети Ethernet даже в рамках использования сервиса QoS. Таково реальное положение дел, и оно означает, что при наличии сетевой компоненты затруднительно 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 прохождении сетевых пакетов через маршрутизаторы. Эти запаздывания исследованы недостаточно.

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

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

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

$$dW(t) / dt = C - 0.5 * W(t) * W(t - R(t)) / p(t - R(t)) \quad (1)$$

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

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

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

$R(t)$  – время возврата подтверждения:  $R(t) = q(t)/C + T_d$ ;

$C$  – пропускная способность канала (пакетов/сек.);

$T_d$  – 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  $[0, 1]$ .

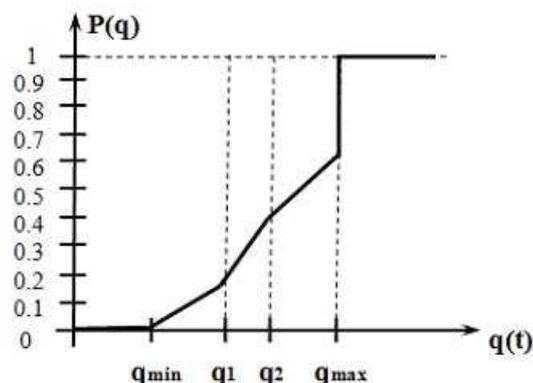


Рисунок 1 – Вероятность отбрасывания пакета в зависимости от длины очереди

Данный график (рисунок 1) представляет собой зависимость вероятности отбрасывания пакета в зависимости от длины очереди и определяет вероятностных характер модели RED. Виды подобных графиков обсуждаются в литературе [3-9]. Мы в этой статье не обсуждаем 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. 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.



Рисунок 2 – Схема алгоритма RED маршрутизации

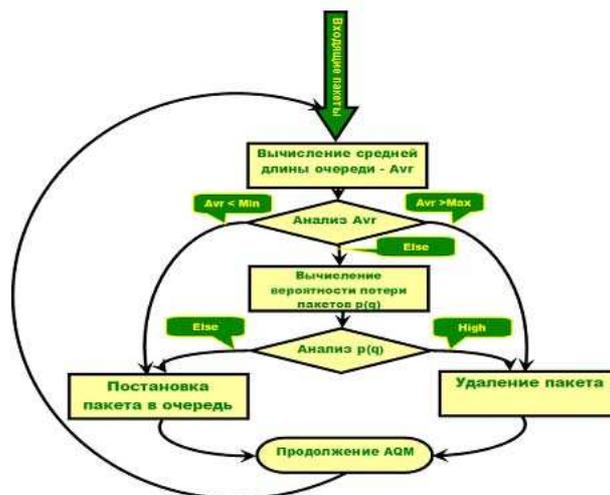


Рисунок 3 – Алгоритм RED маршрутизации

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

Критика ранее достигнутых результатов [3-9]:

- 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.
- Моделирование показывает, что важнейшей является зависимость от времени  $R(t)$  (времени возврата подтверждения). При этом замкнутая САУ оказывается обладающей переменным запаздыванием, что не учитывается.
- Наиболее интересным является режим повышенного джиттера, то есть, периодически меняющегося запаздывания. Этот режим соответствует автоколебаниям в замкнутой САУ. Но параметры автоколебаний не исследуются.
- Очевидно, что вследствие нелинейности, система может работать во многих различных режимах, в зависимости от параметров. Границы этих режимов не исследованы.
- Не исследованы случайные факторы, в частности, посторонний трафик.
- Единственным исключением являются [7,9], где использован подход теории абсолютной устойчивости (гиперустойчивости).

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

Проведенное 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.

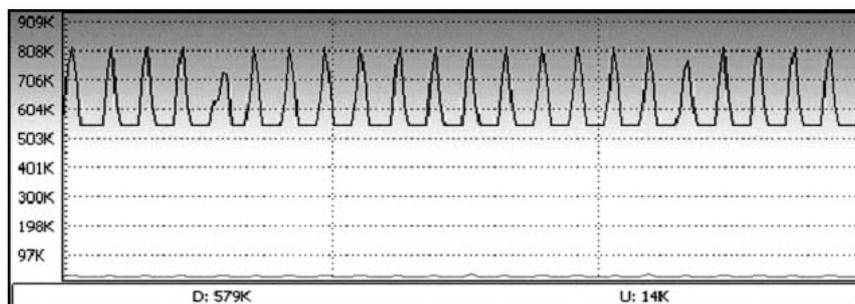


Рисунок 4 – Экспериментально полученные данные при передаче большого файла Интернет

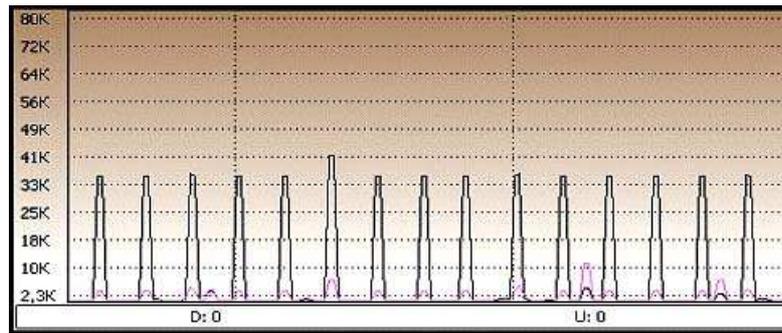


Рисунок 5 – Экспериментально полученные данные при передаче большого файла, локальная сеть.

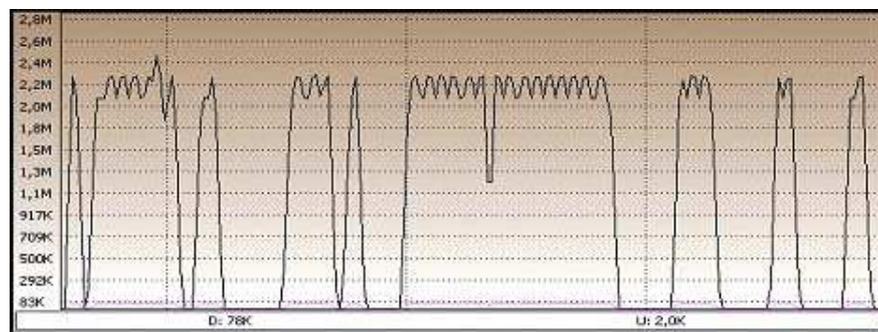


Рисунок 6 – Экспериментально полученные данные при передаче большого файла 100 Мб. Интернет.

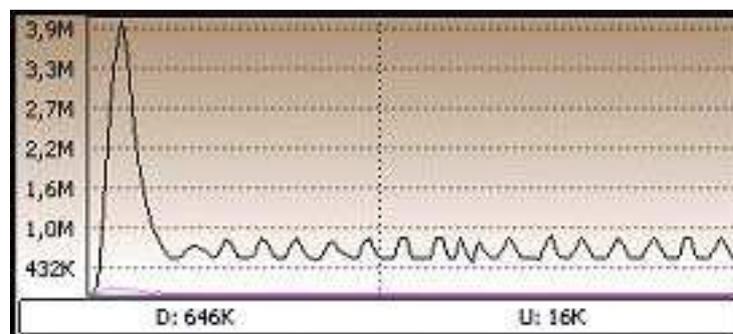


Рисунок 7 – Экспериментально полученные данные при передаче потокового видео YouTube.

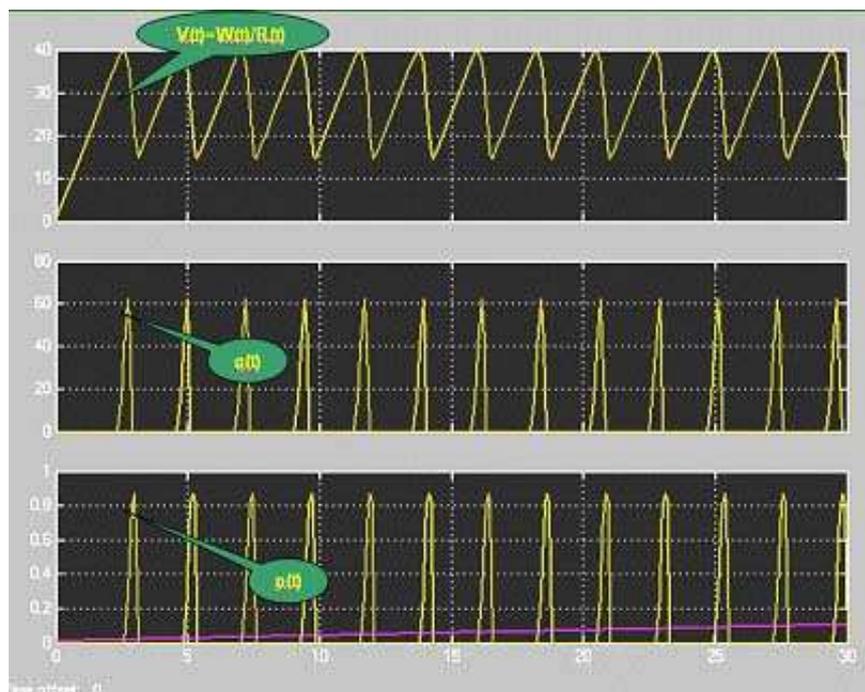


Рисунок 8 – Модель Matlab-Simulink на основе уравнений RED (1 – 2).

- ★ Время задержки распространения:  $T_d = 0.25c$ .
- ★ Число потоков:  $N=100$ .
- ★ Пропускная способность канала:  $C = 3750$  пакетов/с.

*Выводы по результатам моделирования AQM RED:*

- Во многих случаях наблюдаются режимы с периодически меняющимся запаздыванием распространения сигнала (джиттером).
- Эти режимы являются типичными и возникают при нормальных (не критических) условиях функционирования роутера.
- Величина запаздывания может меняться значительно (в разы).
- Характерные периоды изменения запаздывания имеют порядок единиц секунд.
- При использовании сетей TCP при передаче сигналов реального времени в системах автоматического управления целесообразно учитывать имеющийся (возможный) джиттер.
- Форма колебаний – пилообразная или близкая к гармоническим.

*Литература*

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cisco.com/web/psa/technologies/index.html?c=268435881>.
2. Туманов М.П. Результаты моделирования переменного запаздывания в распределённой системе автоматического управления с использованием модифицированных частотных методов. Программное и информационное обеспечение систем различного назначения на базе персональных ЭВМ: Межвузовский сборник научных трудов / Под редакцией д.т.н. проф. Михайлова Б.М. – М.: МГАПИ, 2003, выпуск 6. – с. 251-252.

3. Holot C.V., 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.
4. Floyd S., Jacobson V. Random Early Detection gateways for congestion avoidance // IEEE/ACM Trans. on Networking, 1997, Vol.1, No. 4.
5. Kunniyur S Srikant R. A Time Scale Decomposition Approach to Adaptive ECN Marking // Proceedings of IEEE/INFOCOM, 2001.
6. Firoiu V., Borden M. A Study of Active Queue Management for Congestion Control // Proceedings of IEEE/INFOCOM, 2000.
7. Aun Haider, Harsha Sirisena, Krzysztof Pawlikowski and Michael J. Ferguson. Congestion Control Algorithms in High Speed Telecommunication Networks. ORSNZ Conference Twenty Naught One 30 November to 1 December, 2001 University of Canterbury, Christchurch, NZ.
8. 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.
9. Holot C.V., Misra V., Towsley D., Wei-Bo Gong. A control theoretic analysis of RED // IEEE INFOCOMM, 2001.