

УДК 004.021:519.2:519.6

DOI: 10.22363/2312-9735-2018-26-3-272-284

Параметрическое исследование системы с модулем активного управления трафиком

Т. Р. Велиева

*Кафедра прикладной информатики и теории вероятностей
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198*

Автоколебательные режимы в системах управления в сетях передачи данных крайне негативно влияют на характеристики этих сетей. Актуальной является проблема нахождения зон возникновения автоколебаний, а также исследование параметров автоколебаний. Данные исследования крайне трудоёмки из-за существенной нелинейности математической модели. Представляет интерес получение так называемого параметрического портрета, описывающего зоны возникновения автоколебаний в зависимости от значения параметров: одного (двумерный график), двух (трёхмерный график) и так далее. Подобный параметрический портрет позволяет целенаправленно управлять характеристиками исследуемой системы с управлением. Исследование рассматриваемой системы на основе обычной линеаризации путём разложения в ряд Тейлора не представляется возможным из-за исчезновения собственно автоколебательного режима. Поэтому в работе описывается методика параметрического исследования на основе метода гармонической линеаризации. Для верификации полученных теоретических результатов предлагается использовать имитационное моделирование. Кроме того, в работе предлагается использовать для аналитических расчётов систему компьютерной алгебры. Для этого были сформулированы критерии по выбору программного обеспечения. На основе этих критериев был предложен конкретный набор программного обеспечения для аналитических и численных расчётов.

Ключевые слова: активное управление трафиком, имитационное моделирование, NS2, Julia, SymPy, автоколебательный режим

1. Введение

В компьютерных сетях, в которых основным транспортным протоколом выступает протокол TCP [1], большой интерес представляет изучение характеристик технических систем управления трафиком, в частности, маршрутизаторов с модулем активного управления очередью поступающего в него потока данных. В качестве алгоритма активного управления очередью в таких системах обычно выступает один из алгоритмов типа RED (Random Early Detection) [2, 3].

Алгоритм RED [2] использует экспоненциально взвешенное скользящее среднее значение длины очереди \hat{Q} в качестве фактора, определяющего вероятность отбрасывания пакета $p(\hat{Q})$:

$$p(\hat{Q}) = \begin{cases} 0, & 0 < \hat{Q} \leq Q_{\min}, \\ \frac{\hat{Q} - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} p_{\max}, & Q_{\min} < \hat{Q} \leq Q_{\max}, \\ 1, & \hat{Q} > Q_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь Q_{\min} и Q_{\max} — пороговые значения средневзвешенного значения длины очереди, p_{\max} — максимальный уровень сброса пакетов.

Статья поступила в редакцию 29 июня 2018 г.

Публикация подготовлена при поддержке Программы РУДН «5-100» и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00556.

По мере роста \hat{Q} растёт вероятность отбрасывания пакетов $p(\hat{Q})$ (см. (1)).

Совокупность особенностей функционирования транспортного протокола TCP и алгоритма управления приводит к возникновению автоколебательного режима таких параметров системы, как средний размер окна протокола TCP и средний размер очереди пакетов в управляющем модуле, что негативным образом сказывается на показателях качества обслуживания сети [4–6]. Причиной перехода системы в автоколебательный режим может быть неудачный выбор параметров алгоритма управления. В частности, для классического алгоритма управления RED на данный момент не предложено чётких критериев выбора пороговых значений Q_{\min} и Q_{\max} , гарантирующих отсутствие перехода системы в автоколебательный режим. Но можно попытаться выявить зоны возникновения автоколебательного режима системы и проанализировать параметры автоколебаний.

В данной работе предложено описание методики параметрического исследования модели с управлением на основе метода Крылова–Боголюбова [7], известного также как метод гармонической линеаризации [8].

В качестве математически формализованной модели системы с управлением по алгоритму RED в данной работе рассмотрена непрерывная модель, аналогичная предложенным в работах [9–14], с упрощающими предположениями: модель записана в моментах, при этом используется только фаза избежания перегрузок протокола TCP Reno и сброс пакетов при получении 3-х последовательных подтверждений ACK протокола TCP Reno:

$$\begin{cases} \dot{W}(t) = \frac{1}{T(Q, t)} - \frac{W(t)W(t - T(Q, t))}{2T(t - T(Q, t))} p(t - T(Q, t)); \\ \dot{Q}(t) = \frac{W(t)}{T(Q, t)} N(t) - C; \\ \dot{\hat{Q}}(t) = -w_q C \hat{Q}(t) + w_q C Q(t). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь использованы следующие обозначения: W — средний размер окна протокола TCP; Q — среднее значение размера очереди; \hat{Q} — экспоненциально-взвешенное скользящее среднее (EWMA) среднего размера очереди; C — интенсивность обслуживания очереди; T — полное время двойного оборота; $T = T_p + \frac{Q}{C}$, где T_p — время двойного оборота свободной сети (без учёта задержек в оборудовании); $\frac{Q}{C}$ — время нахождения пакета в очереди; N — количество сессий TCP; p — функция сброса пакетов, w_q — весовой коэффициент, определяемый алгоритмом EWMA ($0 < w_q < 1$).

Схема исследований предложена на рис. 1.

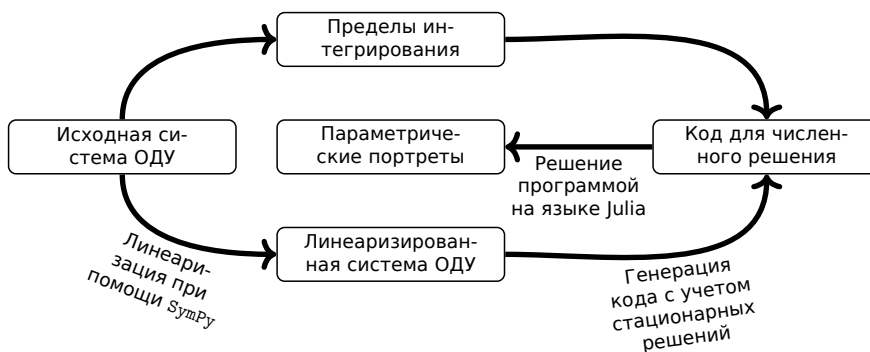


Рис. 1. План исследования

В соответствии со схемой исследований для нахождения параметров автоколебаний систему обыкновенных дифференциальных уравнений (2) необходимо сначала линеаризовать. При этом следует учесть, что при стандартной линеаризации теряется колебательная структура системы [4]. В качестве альтернативы предлагается использовать так называемый метод гармонической линеаризации, краткое описание которого приведено в разделе 2, а более подробное и в применении к системе с управлением по алгоритму RED — в работах [15–17].

При проведении гармонической линеаризации возникает целое семейство моделей. В частности, после линеаризации исходная система (2) распадается на несколько частей (см. рис. 2).

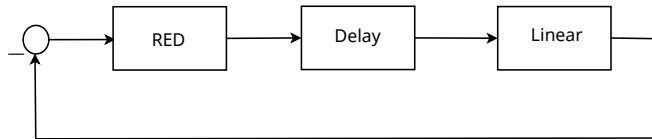


Рис. 2. Схема линеаризованной системы

В разделе 3 демонстрируется применение метода гармонической линеаризации для модели с управлением по алгоритму RED с целью получения коэффициентов гармонической линеаризации, используемых затем в системе компьютерной алгебры для получения семейства моделей с помощью пакета SymPy (см. раздел 4). В дальнейшем также с помощью системы компьютерной алгебры для каждой подмодели были получены наборы файлов на языке Julia, используя которые и задавая разные значения параметров, можно получить параметрический портрет автоколебаний (см. раздел 5). Следует заметить, что вычисления надо произвести для всех подмоделей, хотя решение будет существовать только для одной подмодели.

На заключительном этапе следует провести верификацию полученных результатов. Для этого предложено использовать систему имитационного моделирования NS2 [18] (см. раздел 6).

2. Метод гармонической линеаризации

Метод гармонической линеаризации был предложен Н. Н. Боголюбовым, Н. М. Крыловым [7] и Г. Найквистом [8]. Содержание этого метода сводится к отделению так называемых «медленных» переменных системы от «быстрых». Гармонически линеаризованная система зависит от амплитуд и частот периодических процессов. Это является существенным отличием гармонической линеаризации от обычного способа линеаризации, приводящего к чисто линейным выражениям, что позволяет исследовать основные свойства нелинейных систем.

Метод гармонической линеаризации применяется для систем определённой структуры. Система состоит из линейного H_l и нелинейного H_{nl} звеньев, заданных функцией $f(x)$. Обычно рассматривают статический нелинейный элемент.

На вход нелинейного элемента подаются свободные гармонические колебания:

$$x(t) = x_0 + \tilde{x} := x_0 + A \sin(\omega t). \quad (3)$$

На выходе нелинейного элемента H_{nl} получается периодический сигнал, который можно разложить в ряд Фурье:

$$y = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \sin(k\omega t) + b_k \cos(k\omega t)), \quad (4)$$

где коэффициенты ряда Фурье имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x_0 + A \sin(\omega t)) d(\omega t); \\ a_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x_0 + A \sin(\omega t)) \sin(k\omega t) d(\omega t), \quad k = \overline{1, \infty}; \\ b_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x_0 + A \sin(\omega t)) \cos(k\omega t) d(\omega t), \quad k = \overline{1, \infty}. \end{aligned} \quad (5)$$

Линейный элемент представляет собой фильтр низких частот, то есть при увеличении k линейные элементы подавляют высшие гармоники.

Для сигнала после нелинейного элемента можно записать:

$$y = y_0 + \tilde{y} \approx \varkappa_0(A, \omega, x_0) + [\varkappa(A, \omega, x_0) + i\varkappa'(A, \omega, x_0)]\tilde{x}, \quad (6)$$

где \varkappa_0 — постоянная составляющая, \varkappa и \varkappa' — коэффициенты гармонической линеаризации:

$$\begin{aligned} \varkappa_0(A, \omega, x_0) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x_0 + A \sin(\omega t)) d(\omega t); \\ \varkappa(A, \omega, x_0) &= \frac{a_1}{A} = \frac{1}{A\pi} \int_0^{2\pi} f(x_0 + A \sin(\omega t)) \sin(\omega t) d(\omega t); \\ \varkappa'(A, \omega, x_0) &= \frac{b_1}{A} = \frac{1}{A\pi} \int_0^{2\pi} f(x_0 + A \sin(\omega t)) \cos(\omega t) d(\omega t). \end{aligned} \quad (7)$$

В дополнение к (6) записав

$$z = z_0 + \tilde{z} = (y_0 + \tilde{y})H_l(\omega), \quad x = x_0 + \tilde{x} = g(\omega) - (z_0 + \tilde{z}), \quad (8)$$

можно получить уравнение гармонической линеаризации:

$$\begin{aligned} \left[x_0 + H_l(\omega) \Big|_{\omega=0} \varkappa_0(A, \omega, x_0) \right] + \\ + [1 + H_l(\varkappa(A, \omega, x_0) + i\varkappa'(A, \omega, x_0))] \tilde{x} = g(\omega) := g_0(\omega) + \tilde{g}(\omega), \end{aligned} \quad (9)$$

которое можно разделить на постоянную и гармоническую составляющие:

$$\begin{aligned} \left[x_0 + H_l(\omega) \Big|_{\omega=0} \varkappa_0(A, \omega, x_0) \right] = g_0(\omega), \\ [1 + H_l(\varkappa(A, \omega, x_0) + i\varkappa'(A, \omega, x_0))] \tilde{x} = \tilde{g}(\omega). \end{aligned} \quad (10)$$

При изучении автоколебательного режима предполагается, что внешний сигнал отсутствует ($g = 0$).

3. Гармоническая линейризация модели с управлением по алгоритму RED

В работах [15–17] проведена линейризация модели с управлением по алгоритму RED и получено следующее выражение для функции H_l :

$$H_l(\omega) = - \frac{C^4 T_f^3 w_q}{2N(Cw_q + i\omega)(iT_f\omega + 1)(iCT_f^2\omega - iNT_f\omega + 2N)}. \quad (11)$$

Линеаризованная функция сброса P_{RED} имеет вид, приведённый на рис. 3.

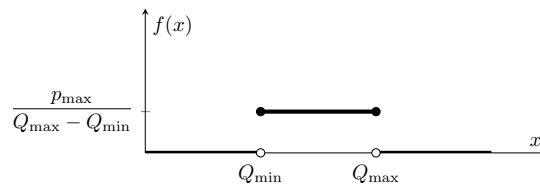


Рис. 3. Линеаризованная функция сброса P_{RED}

Вычислим коэффициенты гармонической линейризации $\varkappa_0(A, \omega, x_0)$, $\varkappa(A, \omega, x_0)$ и $\varkappa'(A, \omega, x_0)$ (7) для статической нелинейности P_{RED} :

$$\begin{aligned} \varkappa_0(A, \omega, x_0) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P_{\text{RED}}(x_0 + A \sin(\omega t)) d(\omega t); \\ \varkappa(A, \omega, x_0) &= \frac{1}{A\pi} \int_0^{2\pi} P_{\text{RED}}(x_0 + A \sin(\omega t)) \sin(\omega t) d(\omega t); \\ \varkappa'(A, \omega, x_0) &= \frac{1}{A\pi} \int_0^{2\pi} P_{\text{RED}}(x_0 + A \sin(\omega t)) \cos(\omega t) d(\omega t). \end{aligned} \quad (12)$$

В зависимости от соотношений между порогами Q_{\min} , Q_{\max} , сдвигом x_0 и амплитудой A возможно получить разные пределы интегрирования. Приведём несколько примеров графического метода нахождения пределов интегрирования (см. рис. 4) в зависимости от соотношений между постоянным сдвигом x_0 , амплитудой A , порогами Q_{\min} и Q_{\max} .

Для примера рассмотрим случай, когда $Q_{\min} < x_0 < Q_{\max}$, $x_0 - A > Q_{\min}$, $x_0 + A > Q_{\max}$. Тогда получим:

$$\begin{aligned} \varkappa_0(A, x_0) &= \frac{1}{2\pi} \frac{p_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \int_0^{\alpha_{\max}} d(\omega t) + \int_{\pi - \alpha_{\max}}^{2\pi} d(\omega t) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{p_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\min}} [2\alpha_{\max} + \pi]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \varkappa(A, x_0) &= \frac{1}{A\pi} \frac{p_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \left[\int_0^{\alpha_{\max}} \sin(\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi - \alpha_{\max}}^{2\pi} \sin(\omega t) d(\omega t) \right] = \\ &= \frac{1}{A\pi} \frac{p_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \left[(-\cos(\omega t)) \Big|_0^{\alpha_{\max}} + (-\cos(\omega t)) \Big|_{\pi - \alpha_{\max}}^{2\pi} \right]; \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varkappa'(A, x_0) &= \frac{1}{A\pi} \frac{p_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \left[\int_0^{\alpha_{\max}} \cos(\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi - \alpha_{\max}}^{2\pi} \cos(\omega t) d(\omega t) \right] = \\ &= \frac{1}{A\pi} \frac{p_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \left[\sin(\omega t) \Big|_0^{\alpha_{\max}} + \sin(\omega t) \Big|_{\pi - \alpha_{\max}}^{2\pi} \right]. \quad (15) \end{aligned}$$

Найдём значения пределов интегрирования:

$$x_0 + A \sin \alpha_{\max} = Q_{\max}, \quad \sin \alpha_{\max} = \frac{Q_{\max} - x_0}{A}; \quad \cos \alpha_{\max} = \sqrt{1 - \frac{(Q_{\max} - x_0)^2}{A^2}}. \quad (16)$$

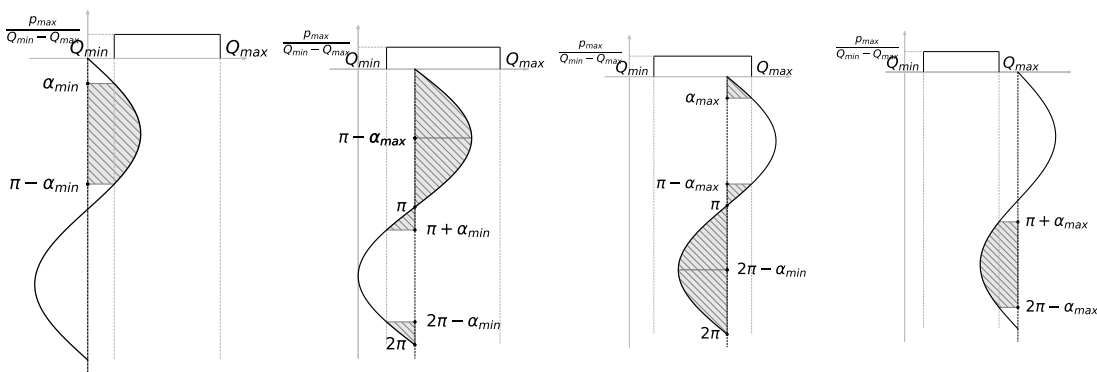


Рис. 4. Границы интегрирования

Таким образом, из (13)–(15) с учётом (16) получим:

$$\begin{aligned} \varkappa_0(A, x_0) &= \frac{p_{\max}}{2\pi(Q_{\max} - Q_{\min})} \left[2 \operatorname{asin} \left(\frac{Q_{\max} - x_0}{A} \right) + \pi \right]; \\ \varkappa(A, x_0) &= -\frac{2p_{\max}}{\pi A(Q_{\max} - Q_{\min})} \sqrt{1 - \frac{(Q_{\max} - x_0)^2}{A^2}}; \\ \varkappa'(A, x_0) &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Полученные коэффициенты гармонической линеаризации в дальнейшем можно использовать для генерации кода программы с помощью системы компьютерной алгебры.

4. О программной реализации модели с управлением по алгоритму RED

Программная реализация модели с управлением по алгоритму RED проводилась в два этапа. На первом этапе была задействована система компьютерной алгебры с пакетом SymPy. С помощью этой системы проведена вся трудоёмкая обработка полученных формул. Затем результирующие выражения были использованы как для генерации программ численных расчётов, так и при переносе формул в текст научных работ.

Наиболее подходящей для поставленных в этой работе задач системой символьных вычислений является SymPy [19]. SymPy подходит нам по следующим причинам:

- в качестве интерактивной оболочки удобно использовать блокнот Jupyter, являющийся компонентом системы iPython [20], реализующей идеологию REPL;
- язык Python фактически используется как соединительный язык, своего рода язык-клей, который позволяет интегрировать между собой разные программные продукты; кроме того, в рамках библиотеки SciPy [21] поддерживается большое число выходных форматов;
- выходные данные SymPy возможно естественным образом передать для численных расчётов в библиотеку NumPy [22] и разные языки программирования.

В качестве языка для вычислений был выбран язык Julia [23]. Этот язык имеет ряд интересных особенностей, в частности он позиционируется как современная реинкарнация языка FORTRAN. Он поддерживает одновременно и этап прототипирования, и написание конечной версии программы.

Фрагменты разработанного программного кода для расчёта нелинейной передаточной функции H_{nl} , выделения её действительной и мнимой частей, перехода после линеаризации исходной модели к H_l , а также перехода к программному коду на языке Julia для последующих численных расчётов приведены в работе [24].

5. Параметрическое исследование системы на возникновение автоколебаний

В качестве иллюстрации определения зоны возникновения автоколебаний приведём конкретный пример. Зададим следующие параметры для модели с управлением по алгоритму RED: количество сессий TCP $N = 60$, время двойного оборота $T_p = 0,5$ с, значения порогов $Q_{\min} = 75$ пакетов и $Q_{\max} = 150$ пакетов, максимальный уровень сброса $p_{\max} = 0,1$, вестовой коэффициент EWMA $w_q = 0,002$. Построив параметрический портрет (см. рис. 5), получим, что точкой перехода в автоколебательный режим является значение интенсивности обслуживания $C_a = 15$ Mbps, т.е. при $C \geq C_a$ система будет находиться в автоколебательном режиме.

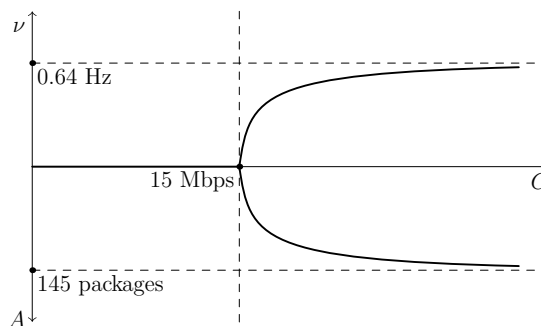


Рис. 5. Параметрический портрет

6. Верификация результатов

Использование натурального эксперимента сопряжено определёнными трудностями. Реальное оборудование не всегда бывает в наличии. Использование виртуального стенда связано с высокими требованиями к компьютерному оборудованию [12]. Кроме того, поскольку моделирование происходит в реальном времени, то весь процесс является крайне длительным.

Для экономии ресурсов и времени обычно используют средства имитационного моделирования. Пакет ns2 [18, 25] является средством имитационного моделирования сетевых протоколов и создавался как эталонное средство моделирования. Поэтому его зачастую используют как альтернативу натурному эксперименту.

Для имитационного эксперимента использована так называемая «гантельная» топология (см. рис. 6), в которой дополнительные сессии TCP эмитируются путём добавления дополнительных источников (см. рис. 7).

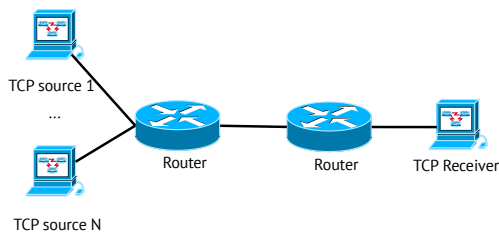


Рис. 6. Гантельная топология

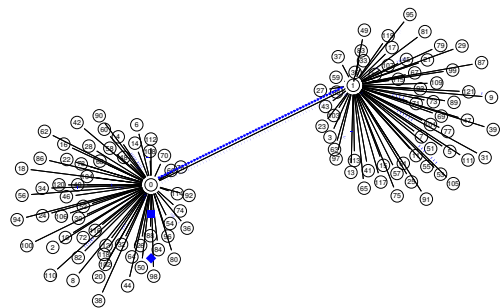


Рис. 7. Визуализация моделирования системы

Программа для ns2 пишется на языке TCL [26, 27]. Фрагменты программного кода ns2 для исследуемой модели, а также фрагменты кода на языке Julia [23], отвечающего за построение спектрального портрета автоколебательного режима на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье [28] были представлены в работе [29].

На рис. 8 и 9 показано поведение средней длины очереди при интенсивности обслуживания $C = 5$ МБит/с и $C = 20$ МБит/с. Во втором случае явно видно наличие автоколебательного режима. Теоретически полученные характеристики этого режима: частота автоколебаний $\nu = 0.6$ Гц, амплитуда колебаний $A = 150$ пакетов.

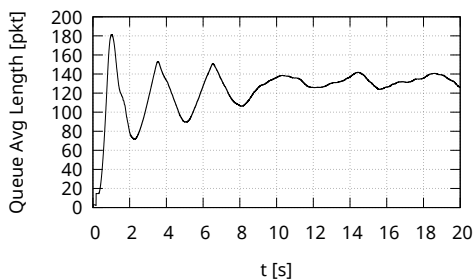


Рис. 8. Поведение средней длины очереди при интенсивности обслуживания $C = 5$ МБит/с

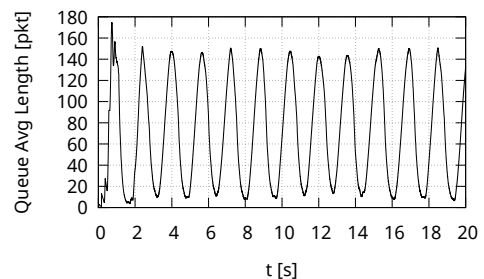


Рис. 9. Поведение средней длины очереди при интенсивности обслуживания $C = 20$ МБит/с

При спектральном исследовании результатов имитационного эксперимента получены следующие характеристики: частота автоколебаний $\nu = 0.5$ Гц, амплитуда колебаний $A = 169$ пакетов (см. рис. 10 и рис. 11). Как видно, теоретические и экспериментальные значения весьма близки.

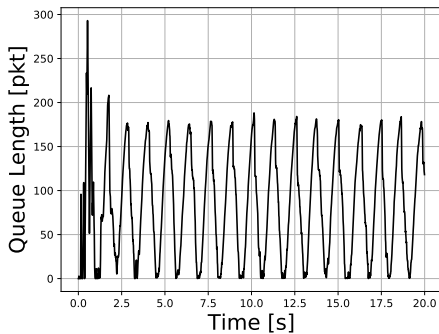


Рис. 10. Поведение мгновенной длины очереди при интенсивности обслуживания $C = 20$ МБит/с

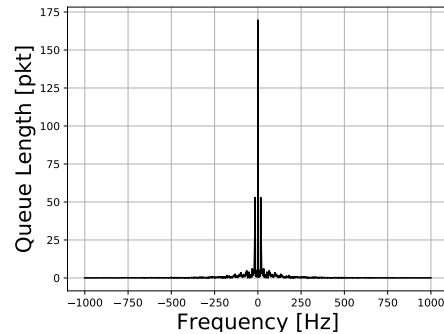


Рис. 11. Спектр автоколебаний мгновенной длины очереди при интенсивности обслуживания $C = 20$ МБит/с

Таким образом, наш программный комплекс может служить целям верификации теоретических исследований по возникновению автоколебательного режима в системах с управлением.

7. Заключение

В данной работе проведено параметрическое исследование системы с модулем активного управления трафиком по алгоритму типа RED. Предложена методика параметрического исследования модели с управлением. Для демонстрации применения методики для систем с заданными параметрами алгоритма управления разработан программный комплекс для аналитических и численных вычислений. Верификация теоретических результатов проведена в системе имитационного моделирования NS2. Показана близость теоретических и экспериментальных значений.

Литература

1. *Allman M., Paxson V., Blanton E.* TCP Congestion Control: Techrep. — 2009. — DOI: 10.17487/rfc5681.
2. *Floyd S., Jacobson V.* Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance // IEEE/ACM Transactions on Networking. — 1993. — Vol. 1, No 4. — Pp. 397–413. — DOI: 10.1109/90.251892.
3. *Королькова А. В., Кулябов Д. С., Черноиванов А. И.* К вопросу о классификации алгоритмов RED // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». — 2009. — № 3. — С. 34–46.
4. *Jenkins A.* Self-Oscillation // Physics Reports. — 2013. — Vol. 525, No 2. — Pp. 167–222. — DOI: 10.1016/j.physrep.2012.10.007.
5. *Ren F., Lin C., Wei B.* A Nonlinear Control Theoretic Analysis to TCP-RED System // Computer Networks. — 2005. — Vol. 49, No 4. — Pp. 580–592. — DOI: 10.1016/j.comnet.2005.01.016.

6. *Lautenschlaeger W., Francini A.* Global Synchronization Protection for Bandwidth Sharing TCP Flows in High-Speed Links // Proc. 16-th International Conference on High Performance Switching and Routing, IEEE HPSR 2015. — Budapest, Hungary: 2015.
7. *Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н.* Символические методы нелинейной механики в их приложениях к исследованию резонанса в электронном генераторе // Известия Академии наук СССР. VII серия. Отделение математических и естественных наук. — 1934. — № 1. — С. 7–34.
8. *Nyquist H.* Regeneration Theory // Bell System Technical Journal. — 1932. — Vol. 11, No 1. — Pp. 126–147. — DOI: 10.1002/j.1538-7305.1932.tb02344.x.
9. *Misra V., Gong W.-B., Towsley D.* Stochastic Differential Equation Modeling and Analysis of TCP-WindowSize Behavior // Proceedings of PERFORMANCE. — 1999. — Vol. 99.
10. *Misra V., Gong W.-B., Towsley D.* Fluid-Based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. — 2000. — Vol. 30, No 4. — Pp. 151–160. — DOI: 10.1145/347057.347421.
11. On Designing Improved Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows / C. V. V. Hollot, V. Misra, D. Towsley, Wei-Bo Gong // Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No.01CH37213). — Vol. 3. — IEEE, 2001. — Pp. 1726–1734. — DOI: 10.1109/INFCOM.2001.916670.
12. *Velieva T. R., Korolkova A. V., Kulyabov D. S.* Designing Installations for Verification of the Model of Active Queue Management Discipline RED in the GNS3 // 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — IEEE Computer Society, 2015. — Pp. 570–577. — DOI: 10.1109/ICUMT.2014.7002164.
13. Hybrid Simulation Of Active Traffic Management / A. V. Korolkova, T. R. Velieva, P. A. Abaev et al. // Proceedings 30th European Conference on Modelling and Simulation. — 2016. — Pp. 685–691. — DOI: 10.7148/2016-0685.
14. *Brockett R.* Stochastic Analysis for Fluid Queueing Systems // Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.99CH36304). — Vol. 3. — IEEE, 1999. — Pp. 3077–3082. — DOI: 10.1109/CDC.1999.831407.
15. The Approach to Investigation of the Regions of Self-Oscillations / T. R. Velieva, D. S. Kulyabov, A. V. Korolkova, I. S. Zaryadov // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 937. — Pp. 012057_1–8. — ISSN 1742-6588. — DOI: 10.1088/1742-6596/937/1/012057.
16. *Кулябов Д. С., Королькова А. В., Велиева Т. Р.* Применение метода гармонической линеаризации к исследованию автоколебательного режима систем с управлением // Вестник РУДН. Серия: Математика. Информатика. Физика. — 2017. — Т. 25, № 3. — С. 234–252. — DOI: 10.22363/2312-9735-2017-25-3-234-252.
17. The Methodology of Studying of Active Traffic Management Module Self-oscillation Regime / D. S. Kulyabov, A. V. Korolkova, T. R. Velieva et al. // DepCoS-RELCOMEX 2017: Advances in Dependability Engineering of Complex Systems / Ed. by W. Zamojski, J. Mazurkiewicz, J. Sugier et al. — Cham: Springer International Publishing, 2018. — Vol. 582 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — Pp. 215–224. — DOI: 10.1007/978-3-319-59415-6_21.
18. *Issariyakul T., Hossain E.* Introduction to Network Simulator NS2. — Boston, MA: Springer US, 2012. — P. 510. — DOI: 10.1007/978-1-4614-1406-3.
19. *Lamy R.* Instant SymPy Starter. — Packt Publishing, 2013. — 52 p.
20. *Perez F., Granger B. E.* IPython: A System for Interactive Scientific Computing // Computing in Science & Engineering. — 2007. — Vol. 9, No 3. — Pp. 21–29. — DOI: 10.1109/MCSE.2007.53.

21. *Oliphant T. E.* Python for Scientific Computing // Computing in Science & Engineering. — 2007. — Vol. 9, No 3. — Pp. 10–20. — DOI: 10.1109/MCSE.2007.58.
22. *Oliphant T. E.* Guide to NumPy. — 2 edition edition. — CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. — P. 364.
23. *Joshi A., Lakhanpal R.* Learning Julia. — Packt Publishing, 2017. — P. 316.
24. Software Package Development for the Active Traffic Management Module Self-Oscillation Regime Investigation / T. R. Velieva, A. V. Korolkova, A. V. Demidova, D. S. Kulyabov // DepCoS-RELCOMEX 2018: Contemporary Complex Systems and Their Dependability / Ed. by W. Zamojski, J. Mazurkiewicz, J. Sugier et al. — Cham: Springer International Publishing, 2019. — Vol. 761 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — Pp. 515–525. — DOI: 10.1007/978-3-319-91446-6_48.
25. *Altman E., Jiménez T.* NS Simulator for Beginners // Synthesis Lectures on Communication Networks. — 2012. — Vol. 5, No 1. — Pp. 1–184. — DOI: 10.2200/S00397ED1V01Y201112CNT010.
26. *Welch B., Jones K.* Practical Programming in Tcl and Tk. — 4th edition. — Prentice Hall, 2003. — P. 960.
27. *Nadkarni A. P.* The Tcl Programming Language: A Comprehensive Guide. — CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017. — P. 668.
28. *Rao K. R., Kim D. N., Hwang J. J.* Fast Fourier Transform - Algorithms and Applications. Signals and Communication Technology. — Springer, 2010. — P. 426.
29. Software Package For The Active Queue Management Module Model Verification / T. R. Velieva, A. V. Korolkova, M. N. Gevorkyan et al. // Proceedings 32st European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2018 / Ed. by L. Nolle, A. Burger, C. Tholen et al. — Wilhelmshaven: European Council for Modelling and Simulation, 2018. — Pp. 498–504.

UDC 004.021:519.2:519.6

DOI: 10.22363/2312-9735-2018-26-3-272-284

Parametric Study of the System with Active Queue Management Module

T. R. Velieva

*Department of Applied Probability and Informatics
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation*

Self-oscillating modes in control systems of computer networks quite negatively affect the characteristics of these networks. The problem of finding the areas of self-oscillations is actual and important as the study of parameters of self-oscillations. These studies are extremely labor-intensive because of the substantial non-linear nature of the mathematical model. It is of interest to obtain a so-called parametric portrait describing the zones of occurrence of self-oscillations depending on the value of the parameters: one parameter (two-dimensional graph), two parameters (three-dimensional graph), and so on. Such a parametric portrait allows us to purposefully manage the characteristics of the investigated control system. The investigation of the system under consideration on the basis of ordinary linearization by Taylor expansion is not possible because of the disappearance of the self-oscillatory regime. Therefore, the paper describes a parametric study technique based on the method of harmonic linearization. To verify the theoretical results obtained, simulation is used. In addition, it is proposed to use the computer algebra system for analytical calculations. For this, the criteria for choosing software were formulated. Based on these criteria, a set of software for analytical and numerical calculations was proposed.

Key words and phrases: active queue management, simulation, NS2, Julia, SymPy, self-oscillating

References

1. M. Allman, V. Paxson, E. Blanton, TCP Congestion Control, Tech. rep. (sep 2009). doi:10.17487/rfc5681.
2. S. Floyd, V. Jacobson, Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 1 (4) (1993) 397–413. doi:10.1109/90.251892.
3. A. V. Korolkova, D. S. Kulyabov, A. I. Chernovyanov, On the Classification of RED Algorithms, *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series "Mathematics. Information Sciences. Physics"* (3) (2009) 34–46.
4. A. Jenkins, Self-Oscillation, *Physics Reports* 525 (2) (2013) 167–222. arXiv:1109.6640, doi:10.1016/j.physrep.2012.10.007.
5. F. Ren, C. Lin, B. Wei, A Nonlinear Control Theoretic Analysis to TCP-RED System, *Computer Networks* 49 (4) (2005) 580–592. doi:10.1016/j.comnet.2005.01.016.
6. W. Lautenschlaeger, A. Francini, Global Synchronization Protection for Bandwidth Sharing TCP Flows in High-Speed Links, in: *Proc. 16-th International Conference on High Performance Switching and Routing, IEEE HPSR 2015, Budapest, Hungary, 2015*. arXiv:1602.05333.
7. N. Kryloff, N. Bogoliuboff, Les mees symboliques de la Meque non Line dans leur application a de la rence dans l'oscillateur, *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS. Classe des sciences mathématiques et na* (1) (1934) 7–34.
8. H. Nyquist, Regeneration Theory, *Bell System Technical Journal* 11 (1) (1932) 126–147. doi:10.1002/j.1538-7305.1932.tb02344.x.
9. V. Misra, W.-B. Gong, D. Towsley, Stochastic Differential Equation Modeling and Analysis of TCP-Window Size Behavior, *Proceedings of PERFORMANCE 99*.
10. V. Misra, W.-B. Gong, D. Towsley, Fluid-Based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 30 (4) (2000) 151–160. doi:10.1145/347057.347421.
11. C. V. Hollot, V. Misra, D. Towsley, Wei-Bo Gong, On Designing Improved Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows, in: *Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No.01CH37213), Vol. 3, IEEE, 2001*, pp. 1726–1734. doi:10.1109/INFCOM.2001.916670.
12. T. R. Velieva, A. V. Korolkova, D. S. Kulyabov, Designing Installations for Verification of the Model of Active Queue Management Discipline RED in the GNS3, in: *6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), IEEE Computer Society, 2015*, pp. 570–577. arXiv:1504.02324, doi:10.1109/ICUMT.2014.7002164.
13. A. V. Korolkova, T. R. Velieva, P. A. Abaev, L. A. Sevastianov, D. S. Kulyabov, Hybrid Simulation of Active Traffic Management, *Proceedings 30th European Conference on Modelling and Simulation (2016)* 685–691 doi:10.7148/2016-0685.
14. R. Brockett, Stochastic Analysis for Fluid Queueing Systems, in: *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.99CH36304), Vol. 3, IEEE, 1999*, pp. 3077–3082. doi:10.1109/CDC.1999.831407.
15. T. R. Velieva, D. S. Kulyabov, A. V. Korolkova, I. S. Zaryadov, The Approach to Investigation of the Regions of Self-Oscillations, *Journal of Physics: Conference Series* 937 (2017) 012057_1–8. doi:10.1088/1742-6596/937/1/012057.
16. D. S. Kulyabov, A. V. Korolkova, T. R. Velieva, Application of the Harmonic Linearization Method to the Study a Control Systems with a Self-Oscillatory Regime, *RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics* 25 (3) (2017) 234–252, in Russian. doi:10.22363/2312-9735-2017-25-3-234-252.
17. D. S. Kulyabov, A. V. Korolkova, T. R. Velieva, E. G. Eferina, L. A. Sevastianov, The Methodology of Studying of Active Traffic Management Module Self-oscillation Regime, in: *W. Zamojski, J. Mazurkiewicz, J. Sugier, T. Walkowiak, J. Kacprzyk (Eds.), DepCoS-RELCOMEX 2017: Advances in Dependability Engineering of Complex Systems, Vol. 582 of Advances in Intelligent Systems and Computing,*

- Springer International Publishing, Cham, 2018, pp. 215–224. doi:10.1007/978-3-319-59415-6_21.
18. T. Issariyakul, E. Hossain, Introduction to Network Simulator NS2, Springer US, Boston, MA, 2012. doi:10.1007/978-1-4614-1406-3.
 19. R. Lamy, Instant SymPy Starter, Packt Publishing, 2013.
 20. F. Perez, B. E. Granger, IPython: A System for Interactive Scientific Computing, Computing in Science & Engineering 9 (3) (2007) 21–29. doi:10.1109/MCSE.2007.53.
 21. T. E. Oliphant, Python for Scientific Computing, Computing in Science & Engineering 9 (3) (2007) 10–20. doi:10.1109/MCSE.2007.58.
 22. T. E. Oliphant, Guide to NumPy, 2nd Edition, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015.
 23. A. Joshi, R. Lakhanpal, Learning Julia, Packt Publishing, 2017.
 24. T. R. Velieva, A. V. Korolkova, A. V. Demidova, D. S. Kulyabov, Software Package Development for the Active Traffic Management Module Self-Oscillation Regime Investigation, in: W. Zamojski, J. Mazurkiewicz, J. Sugier, T. Walkowiak, J. Kacprzyk (Eds.), DepCoS-RELCOMEX 2018: Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 761 of Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer International Publishing, Cham, 2019, pp. 515–525. doi:10.1007/978-3-319-91446-6_48.
 25. E. Altman, T. Jiménez, NS Simulator for Beginners, Synthesis Lectures on Communication Networks 5 (1) (2012) 1–184. doi:10.2200/S00397ED1V01Y201112CNT010.
 26. B. Welch, K. Jones, Practical Programming in Tcl and Tk, 4th Edition, Prentice Hall, 2003.
 27. A. P. Nadkarni, The Tcl Programming Language: A Comprehensive Guide, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017.
 28. K. R. Rao, D. N. Kim, J. J. Hwang, Fast Fourier Transform - Algorithms and Applications, Signals and Communication Technology, Springer, 2010.
 29. T. R. Velieva, A. V. Korolkova, M. N. Gevorgyan, S. A. Vasilyev, I. S. Zaryadov, D. S. Kulyabov, Software Package For The Active Queue Management Module Model Verification, in: L. Nolle, A. Burger, C. Tholen, J. Werner, J. Wellhausen (Eds.), Proceedings 32st European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2018, European Council for Modelling and Simulation, Wilhelmshaven, 2018, pp. 498–504.

© Велieва Т. Р., 2018

Для цитирования:

Велieва Т. Р. Параметрическое исследование системы с модулем активного управления трафиком // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика. Информатика. Физика. — 2018. — Т. 26, № 3. — С. 272–284. — DOI: 10.22363/2312-9735-2018-26-3-272-284.

For citation:

Velieva T. R. Parametric Study of the System with Active Queue Management Module, RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics 26 (3) (2018) 272–284. DOI: 10.22363/2312-9735-2018-26-3-272-284. In Russian.

Сведения об авторах:

Велieва Татьяна Рефатовна — аспирант кафедры прикладной информатики и теории вероятностей РУДН (e-mail: velieva_tr@rudn.university, тел.: +7(495)9520250)

Information about the authors:

Velieva T. R. — PhD student of Department of Applied Probability and Informatics of Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University) (e-mail: velieva_tr@rudn.university, phone: +7(495)9520250)