

УДК 004.7.052:004.414.2

Жуков И.А., д-р.тех.наук

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОРПОРАТИВНЫМИ КОМПЬЮТЕРНЫМИ СЕТЯМИ

Национальный авиационный университет

*Исследованы динамические характеристики систем управления корпоративными компьютерными сетями для потоков данных с различными статистическими характеристиками. Предложен метод стабилизации системы управления при наличии случайных задержек управляющей и сигнальной информации.*

### Введение

Задача управления компьютерной сетью, состоящей из нескольких автономных сегментов, сводится к решению следующих частных задач:

- идентификация состояний сетевого оборудования;
- выработка управляющих воздействий;
- реализация управляющих воздействий на объект управления.

Сложность решения поставленных задач заключается в наличии случайных задержек управляющей и сигнальной информации, неполноте априорной инфор-

мации о параметрах и состоянии сетевого оборудования. Это может приводить к осцилляциям нагрузки на сетевые узлы (рис.1) и потере устойчивости системы управления (рис.2): при перегрузке узла система управления может пытаться нагрузить его еще больше, а при малой нагрузке – дополнительно разгрузить его (например, путем запуска алгоритмов *Tail Drops* – отсечение конца очереди – или *RED* – случайное раннее обнаружение). Представленные результаты получены путем моделирования по методике, разработанной в [1].

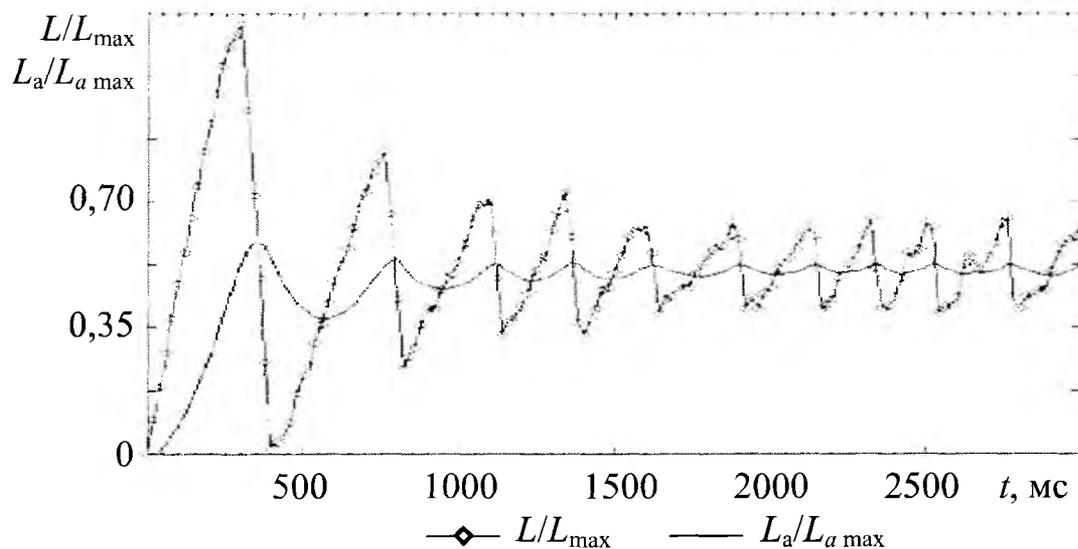


Рис. 1. Осцилляции нагрузки на сетевой узел, выраженной через отношение текущей длины очереди  $L$  к максимальной длине очереди  $L_{max}$  и отношение усредненной длины очереди  $L_a$  к максимальной длине очереди  $L_{a\ max}$ . Система управления сохраняет устойчивость.

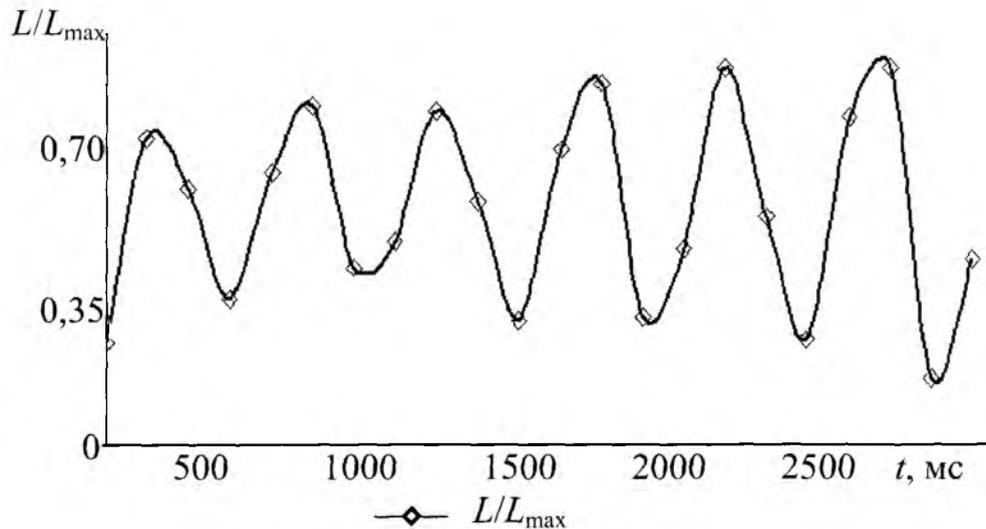


Рис. 2. Осцилляции нагрузки на сетевой узел, выраженной через отношение текущей длины очереди  $L$  к максимальной длине очереди  $L_{\max}$ . Система управления потеряла устойчивость.

Таким образом, при построении системы управления сетью или отдельными ее сегментами необходимо учитывать задержки управляющей информации и контролировать устойчивость системы управления.

### Общая задача управления компьютерной сетью

Рассмотрим задачу управления компьютерной сетью, состоящей из нескольких автономных сегментов (рис.3).

Основные изменения касаются использования протокола *CMIP* для обмена управляющей и сигнальной информацией между системой управления и управляемыми объектами – сетевыми узлами.

Протокол *CMIP* (*Common Management Information Protocol*) представляет собой мощное средство, которое поддерживает множество функций управления. Он может работать на любой платформе (версия для взаимодействия только с *TCP/IP* называется *CMOT*). Доступ к управляющей информации, хранящейся в управляемых объектах, обеспечивается с помощью элемента системы управления, называемого службой *CMSIE* (*Common Management Information Service Element*). Служба *CMSIE* построена в архитектуре распределенного приложения, где часть

функций выполняет менеджер, а часть – агент. Взаимодействие между менеджером и агентом осуществляется по протоколу *CMIP*. Услуги, предоставляемые службой *CMSIE*, отличаются большой гибкостью. Запросы службы могут применяться более чем к одному объекту. Для этого стандарты *CMIP/CMIS* вводят такие понятия, как обзор, фильтрация и синхронизация. Запрос *CMISE* может использовать обзор, чтобы опросить одновременно несколько объектов. Фильтрация заключается в применении булевого выражения к запросу менеджера. Запрос применяется только к тем объектам и их атрибутам, для которых данное булево выражение верно. Булевы выражения могут включать операторы отношения  $=$ ,  $<$ ,  $>$  или определенные атрибуты. Возможно построение сложных фильтров на основе объединения нескольких фильтров в один составной.

При выполнении запросов к нескольким объектам используется одна из двух схем синхронизации: атомарная или «по возможности». При атомарной схеме запрос выполняется только в том случае, когда все объекты, попадающие в область действия обзора или фильтра, могут успешно выполнить данный запрос. Синхронизация «по возможности» подразумевает передачу запроса всем объектам, к

которым запрос относится. Операция завершается при выполнении запроса любым количеством объектов.

Формат протокольных блоков данных *CMIP* так же, как формат блоков *SNMP*, описывается нотацией *ASN.1*, однако, имеет более сложную структуру. Например, блок данных имеет поля для задания имен атрибутов, значения которых запрашивает менеджер, а также поля задания параметров обзора и фильтрации, определяющих множество экземпляров объектов, на которые будет воздействовать данный запрос. Имеются также поля для задания параметров прав доступа к объекту.

Протокол *CMIP* хорошо масштабируется, так как может воздействовать сразу на несколько объектов, а ответы от агентов проходят через фильтры, которые ограничивают передачу управляющей информации только определенным агентам и менеджерам.

Общим положительным свойством рассмотренных протоколов является то, что они имеют гибкий формат кадра с неопределенным количеством полей, имеющих переменную длину, собственные локальные и сетевые адреса, могут обеспечивать передачу символьной информации. Следовательно, передача сигнальной и управляющей информации, т.е. векторов состояния и управления, результатов прогнозирования состояния сети и пр. может осуществляться кадрами *SNMP* или *CMIP* (теоретически – при любой размерности этих векторов).

Таким образом, для обмена информацией при решении задач управления сетями крупного масштаба с большим числом сетевых узлов и значительных различиях их характеристик целесообразно применять протоколы *CMIP* различных модификаций.

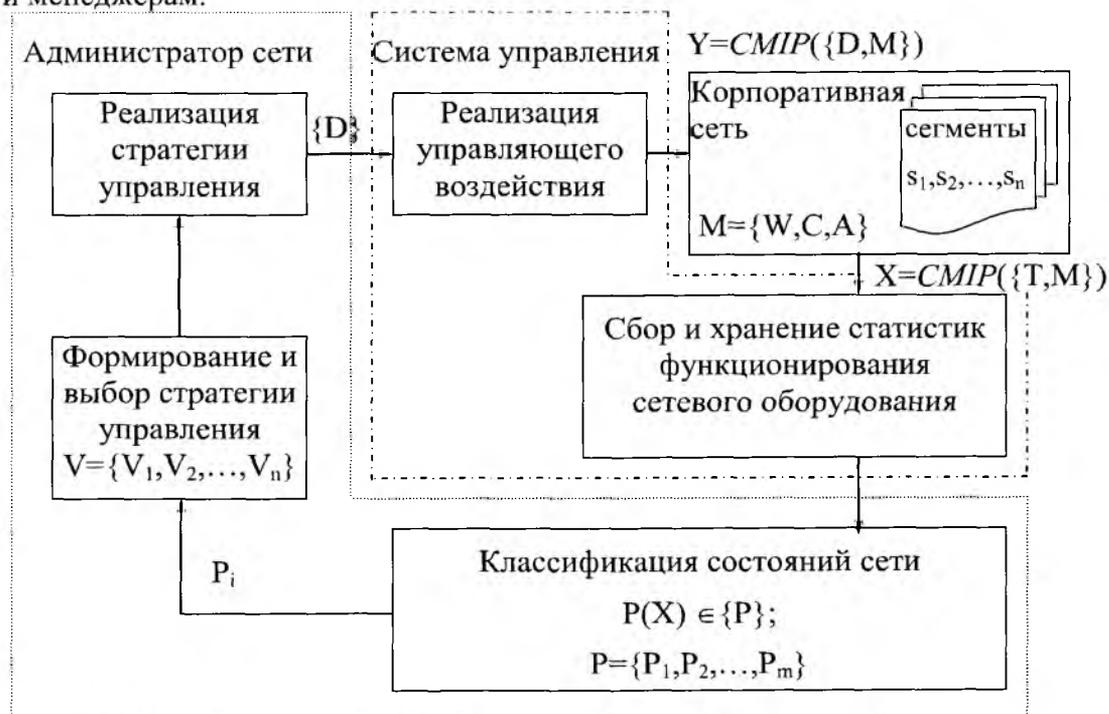


Рис. 3. Структурная схема системы управления корпоративной сетью. *CMIP* – протокол управления сетью;  $s_1, s_2, \dots, s_n$  – сегменты сети;  $M$  – множество объектов управления;  $W$  – множество рабочих станций;  $C$  – множество серверов;  $A$  – множество активных телекоммуникационных устройств;  $X$  – функционал текущего состояния сети;  $T$  – время;  $P$  – множество возможных состояний сети;  $V$  – множество стратегий управления сетью;  $D$  – множество параметров режима функционирования сети;  $Y$  – функционал управляющего воздействия.

### Исследование статистической динамики системы управления

В процессе управления потоками и процессами имеют место задержки получения информации о состоянии и параметрах сети. Также имеют место задержки доставки данных управления к объекту управления. Управление системой описывается дискретизованным дифференциальным уравнением с отклоняющимся аргументом. Аппроксимируем его уравнением в конечных разностях вида [3]:

$$y_{as}(n) \approx y_{as}(n-1) + by_{as}(n-k) + u(n-m), \quad (1)$$

где  $y_{as}(n)$  функция состояния объекта;  $u(n-m)$  – управляющий сигнал;  $k$  и  $m$  – задержки сигналов состояния и управления соответственно. В общем случае  $n \neq m$ .

Системная функция объекта, описываемая уравнением (1), имеет вид:

$$H(z) = \frac{z^{-m}}{1 - z^{-1} - bz^{-k}}. \quad (2)$$

Характеристический полином системной функции (2) в результате задержек информации приобретает специфический вид:

$$z^k - z^{k-1} - b = 0. \quad (3)$$

Ограничением предложенной модели является риск потери устойчивости при случайных изменениях задержек, то есть порядка уравнения (3), а также при попытке достижения нужного качества управления путем простого увеличения коэффициента усиления  $b$  в контуре обратной связи [4]. Поэтому необходим постоянный контроль устойчивости системы управления и приведения ее к устойчивому состоянию при необходимости.

Существует вполне очевидный путь принудительного приведения неустойчивой дискретной системы к устойчивому состоянию [5]: определение положения полюсов системной функции (2) на  $z$ -плоскости и зеркальное отображение внутрь единичного круга, полюсов, кото-

рые находятся вне его. Если модуль корня уравнения  $r_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ ,  $r_{\text{mod}} > 1$ , находим отраженный корень  $r_f$ :

– для действительного корня

$$r_{fi} = 1/r_i; \quad (4)$$

– для комплексного корня

$$r_i = a_i \pm jd_i;$$

$$r_{fi} = \frac{a_i}{a_i^2 + d_i^2} \pm j \frac{d_i}{a_i^2 + d_i^2}. \quad (5)$$

При выполнении условий (4) или (5) частотная характеристика системы не изменяется. Соответственно, сохраняются динамические свойства системы, то есть форма и количественные параметры переходных процессов, которыми определяется качество управления.

Уравнение (1) для устойчивой системы принимает вид:

$$y_{as}(n) \approx b_{k-1}y_{as}(n-1) + b_{k-2}y_{as}(n-2) + \dots + b_1y(n-k+1) + b_0y(n-k) + u(n-m),$$

а системная функция и характеристический полином после отражения неустойчивых корней внутрь единичного круга  $z$ -плоскости – соответственно:

$$H_{st}(z) = \frac{z^{-m}}{1 + b_{k-1}z^{-1} + b_{k-2}z^{-2} + \dots + b_1z^{-k+1} + b_0z^{-k}},$$

$$z^k + b_{k-1}z^{k-1} + b_{k-2}z^{k-2} + \dots + b_1z + b_0 = 0.$$

Значение  $y(n-2), y(n-3), \dots, y(n-k+1)$  определяются по уравнениям модели, которыми описывается желаемое поведение объекта управления. Поэтому представим структуру устройства для вычисления параметров эталонной модели в виде последовательного соединения звеньев второго порядка (биквадратных звеньев), к которым в случае необходимости (непарный порядок характеристического полинома) добавляется звено первого порядка. Удобство такого представления заключается в том, что получаем звено с действительными коэффициентами как в случае

действительных, так и в случае комплексно-сопряженных корней характеристического полинома:

– полином  $1 - z^{-1}(x_1 + x_2) + z^{-2}x_1x_2$ ,  
корни  $x_1, x_2$ ;

– полином  $1 - 2z^{-1}x_1 + z^{-2}(x_1^2x_2^2)$ ,  
корни  $x_1 \pm jx_2$ .

Разностные уравнения для  $i$ -ї би-квадратного звена имеет вид:

$$y_{mi}(n) = b_{i1}y_{mi}(n-1) + b_{i2}y_{mi}(n-2), \quad (8)$$

где коэффициенты  $b_{i1}, b_{i2}$  определяются по отношениям (6) или (7).

Благодаря десенсбилизации модели согласно с упрощенным представлением (8) удается снизить чувствительность системы управления к нестационарности объекта управления и вариации параметров процессов передачи данных управления. Для широкого класса нестационарностей можно обеспечить робастное управление, что особенно важно для таких специфических объектов с распределенными параметрами, как корпоративные сети. Условием робастности управления является структурное согласование между эталоном и объектом управления [6]:

$$\begin{aligned} y_m(n-l) &= \tilde{b}_{n-l+1} y_m(n-l+1), l=2,3,\dots,k-2, \\ \tilde{b}_{n-l+1} &= b_{n-l+1} + c_m(n-l+1)\xi(n-l+1), \\ c_m(n-l+1) &= c_{m0}(1 + \zeta(n-l+1)), \end{aligned}$$

где  $\xi(n-l+1), \zeta(n-l+1)$  – функции с ограниченной вариацией, которые подбираются с учетом физического содержания задачи. Например, можно взять функции в виде суммы постоянной составляющей и гармонического тренда. Для уравнения высокого порядка типа (1) хорошие результаты дает представление функций в виде суммы постоянной составляющей и полиномиального тренда.

Невязка состояний объекта управления и эталонной модели определяется как

$$\varepsilon(n) \approx y(n) - y_m(n), \quad (9)$$

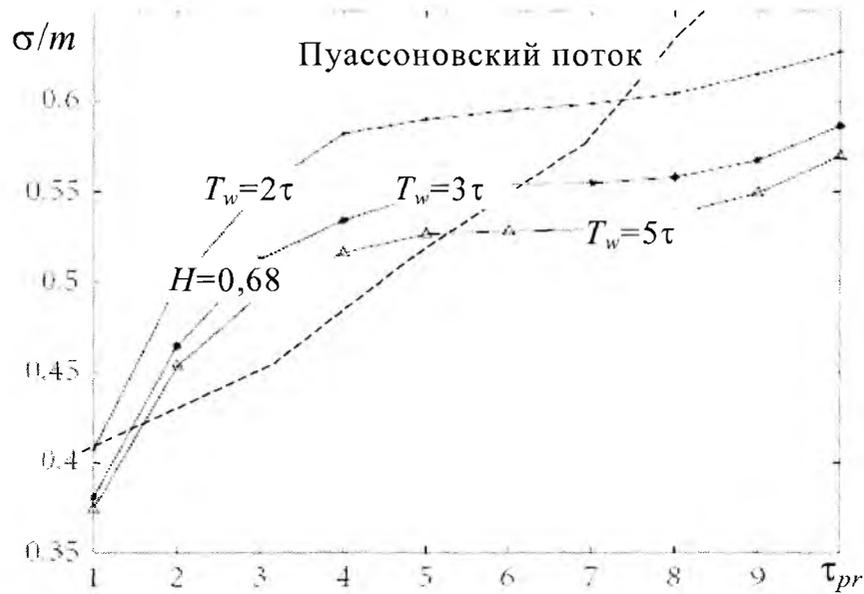
а ее динамика описывается уравнением:

$$\begin{aligned} \varepsilon(n) &= \tilde{b}_n \varepsilon(n-1) + c_m(n)\eta(n), \quad (10) \\ \eta(n) &\approx u_m(n) - \xi(n)y(n) - \\ &(1 + \zeta(n))u(n) - \chi(n) \end{aligned}$$

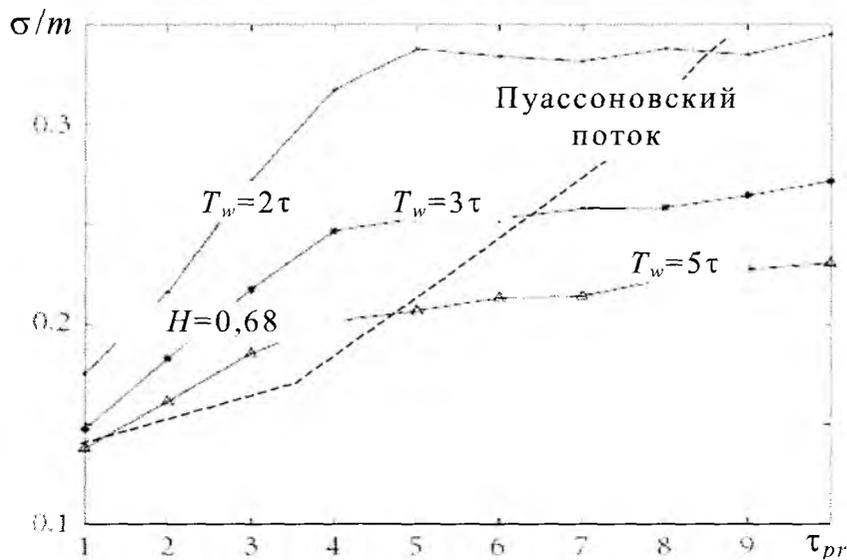
где  $u_m(n)$  – управляющее влияние на эталонную модель;

$\chi(n)$  – случайные возмущения, которые действуют на объект управления.

Задача управления по эталонной модели заключается в приведении невязки решения уравнения (9) к нулю с использованием результатов анализа и прогноза состояния объекта управления и возмущающих влияний (в данном случае – характеристик трафика). В работе [7] для решения задачи прогноза состояния сети предложено применить стандартный метод оценки параметров по критерию минимума среднеквадратической ошибки (МСКО). Однако метод МСКО дает оптимальные результаты только для стационарных (хотя бы в широком смысле) процессов на интервале наблюдения. В то же время всплески интенсивности самоподобного трафика представляют собой нарушение стационарности. С другой стороны, можно ожидать, что оценивание параметров самоподобного трафика как процесса со статистическими характеристиками, которые убывают медленно, будет более эффективным, чем процессов без последствия. Поэтому необходимо проанализировать сравнительную эффективность методов МСКО и аппроксимации полиномами вида (8) для моделей трафика со свойствами самоподобия. На рис. 4 приведены результаты расчетов ошибок предсказания методом МСКО и расчетов по уравнениям (8) и (10).



а)



б)

Рис. 4. Самоподобный (сплошные линии) и пуассоновский (штриховые линии) потоки. а) – метод МСКО, б) – уравнения (8), (10).

Проанализируем относительные ошибки прогноза средней интенсивности трафика.  $\tau_{pr}$  – число периодов задержки управляющей и сигнальной информации.  $m$  – средняя интенсивность трафика на интервале наблюдения  $T_w$ .

Видно, что не только абсолютные значения ошибок во втором методе меньше, но и характер графиков разный. Ошибка прогноза пуассоновского потока, как и следовало ожидать, растет быстрее, поскольку имеет место процесс без последствия.

Результаты расчетов зависимости ошибки прогноза от величины параметра Херста приведены на рис. 5.

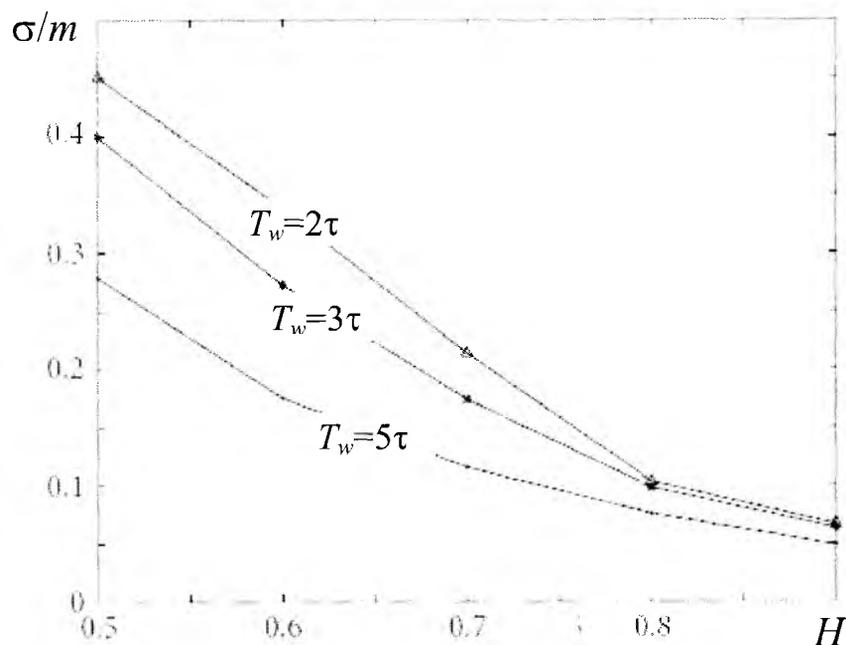


Рис. 5. Залежність відносної помилки прогнозу від параметра Херста.

Необхідно обратить внимание на асимптотическое стремление к нулю ошибок при росте параметра  $H$ , что связано с увеличением времени корреляции самоподобных процессов при стремлении параметра  $H$  к единице.

### Выводы

Задачи управления сетью крупного масштаба могут успешно решаться при условии учета и компенсации задержек сигнальной и управляющей информации. Одним из перспективных путей решения таких задач является применение эталонных моделей состояния управляемого объекта и контроля текущей устойчивости системы управления. В идеале можно реализовать робастную систему управления, толерантную к задержкам управляющей информации, однако для этого необходимо точное согласование структуры эталонной модели и управляемого объекта. Очевидно, для распределенных стохастических систем, к которым относятся компьютерные сети, робастность системы управления можно рассматривать как некое асимптотическое приближение.

### Список литературы

1. Макаренко А.В. Модель динамики коммутатора Gigabit Ethernet // Журнал радиоэлектроники. – 2001. – № 10. <http://jre.cplire.ru/jre/nov01/2/text.html>.
2. Иванов И.А., Леохин Ю.Л. Интеллектуальное управление компьютерными сетями // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – № 12. – С. 26 – 31.
3. Жуков И.А. Анализ устойчивости систем управления корпоративными компьютерными сетями при наличии задержек доставки управляющей информации // УСиМ. – 2010. – № 5. – С. 46 – 51.
4. Zhukov I.A. The method of stability providing in control systems for delay and disruption-tolerant corporate computer networks // Proceedings of the National Aviation University. – 2010. – № 3 (44). – P. 18 – 24.
5. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой фильтрации сигналов. Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1978. – 848 с.
6. Цыкунов А.М. Робастное управление нестационарными объектами // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 2. – С. 117 – 125.
7. Еремин Е.Л. Робастные алгоритмы нестационарных систем управления с явнонеявной эталонной моделью // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2001. – № 3. – С. 61 – 74.