

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ ИНТЕРФЕЙСА НА ДИНАМИКУ ЗАГРУЖЕННОСТИ ОЧЕРЕДИ НА МАРШРУТИЗАТОРЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

Yeremenko O. S., Lebedenko T. M., Starkova O. V. **Analysis of interface state impact to the dynamics of queue utilization on telecommunication network router.** Due to the high dynamics of changes of the interface state in the estimation of the average queue length and the related key indicators of quality of service in a number of important cases requires the use of a dynamic model, obtained by applying a pointwise stationary fluid flow approximation PSFFA and representation of the nonlinear differential equation of state, where the state was understood as the average queue length. As was shown by the analysis, the analytical calculation of the average queue length at the router interface is an important step addressing to the main tasks of queue management. The higher accuracy of calculation of the average queue length, the more informed decisions on the volume of discarded packets from it and the more accurate, in turn, can predict the value of the average delay and packet loss probability at the router interface. Using expressions to calculate the average queue length for the steady state often gives a very rough approximation of the true values. Using dynamic nonlinear model was able to show that the average queue length converges to a steady state value for some time, which can range from few to tens of seconds.

Based on the obtained results, it is determined that the use of the steady state estimations when calculating the average queue length is possible only after the end of the transient process. Otherwise, it is advisable to use a more accurate differential model. As the results of the analysis, the duration of the transient process is influenced by such factors as the flow rate, capacity of the router interface, service discipline, etc. And it was found that the higher the interface throughput, the duration of the transient period is lower. From the set of considered service disciplines it was found that in the case of using the model M/D/1 average queue length convergence to the limit in the steady state is higher than for other models. Within these examples was shown that the use of non-linear differential model can improve the accuracy of the calculation of the average queue length, depending on the state of the interface and the selected service discipline.

**Keywords:** quality of service, interface, flow rate, throughput, coefficient of queue utilization, average queue length

Еременко О. С., Лебеденко Т. М., Старкова О. В. **Аналіз впливу стану інтерфейса на динаміку завантаженості черги на маршрутизаторі телекомунікаційної мережі.** Виконано аналіз впливу стану інтерфейса на динаміку завантаженості черги на маршрутизаторі телекомунікаційної мережі в ході аналітичного розрахунку середньої довжини черги на інтерфейсі маршрутизатора. Як показали результати аналізу, на тривалість перехідного процесу впливають такі фактори як інтенсивність потоку, пропускна здатність інтерфейса маршрутизатора, а також дисципліна обслуговування. При цьому використання нелінійної диференціальної моделі дозволяє поліпшити точність розрахунку середньої довжини черги в залежності від стану інтерфейсу та обраної дисципліни обслуговування.

**Ключові слова:** якість обслуговування, інтерфейс, інтенсивність потоку, пропускна здатність, завантаженість черги, середня довжина черги

Еременко А. С., Лебеденко Т. Н., Старкова Е. В. **Анализ влияния состояния интерфейса на динамику загрузки очереди на маршрутизаторе телекоммуникационной сети.** Выполнен анализ влияния состояния интерфейса на динамику загрузки очереди на маршрутизаторе телекоммуникационной сети в ходе аналитического расчета средней длины очереди на интерфейсе маршрутизатора. Как показали результаты анализа, на длительность переходного процесса влияют такие факторы как интенсивность потока, пропускная способность интерфейса маршрутизатора, а также дисциплина обслуживания. При этом использование нелинейной дифференциальной модели позволяет улучшить точность расчета средней длины очереди в зависимости от состояния интерфейса и выбранной дисциплины обслуживания.

**Ключевые слова:** качество обслуживания, интерфейс, интенсивность потока, пропускная способность, загрузка очереди, средняя длина очереди

**1. Введение и постановка задачи.** Как показал проведенный анализ [1...3], численные значения основных показателей качества обслуживания (средней задержки, джиттера, вероятности потерь пакетов) во многом определяются результативностью решения задач по управлению буферным ресурсом телекоммуникационной сети (ТКС), т.е. очередями пакетов,

которые организуются на интерфейсах маршрутизаторов. При этом колебание длины очереди способствует росту вариации задержки пакетов (джиттера), а перегрузка очереди в целом ведет к увеличению числа отброшенных пакетов. В этой связи технологические механизмы управления очередью должны обладать эффективными механизмами анализа состояния интерфейса маршрутизатора, чтобы управленческие решения соответствовали требованиям относительно обеспечения требуемого качества обслуживания (Quality of Service, QoS).

В научных исследованиях, посвященных решению задач по организации и контролю перегрузки очередей на маршрутизаторах сети, традиционно находит свое применение аппарат теории массового обслуживания [4...7], с помощью которого можно аналитически оценить влияние состояния интерфейса (пропускной способности, загруженности и максимальной длины буфера) на средний размер очереди, а через нее и на численные значения средней задержки, джиттера и вероятности потерь пакетов. Однако инструментарий теории массового обслуживания позволяет получить адекватные оценки искомых параметров лишь для установившегося режима работы интерфейса, т.е. по окончании всех переходных процессов, связанных с изменением состояния интерфейса. Учитывая то, что процессы оценки состояния интерфейса и последующего управления очередями являются процессами реального времени диапазона десятков миллисекунд, то полученные с использованием предельных вероятностей оценки состояния интерфейса могут отличаться от значений, соответствующих динамике незавершенного, в общем случае, переходного процесса. Поэтому при управлении очередями важно располагать моделями, позволяющими описать динамику изменения состояния интерфейса во времени с целью получения более точных оценок длины очереди и связанных с ней показателей QoS.

**2. Выбор и описание математической модели для исследования.** К настоящему времени известно достаточно много разнотипных математических моделей, основанных на различных видах аппроксимаций динамики изменения состояния интерфейса на маршрутизаторе ТКС (табл. 1) [8...10].

**Перечень аппроксимаций, используемых для описания динамики изменения состояния интерфейса**

**Табл. 1**

| <b>Аппроксимация</b>                                      | <b>Краткая характеристика</b>                              |
|---|--|
| The Simple Stationary Approximation (SSA)                 | Простая стационарная аппроксимация                         |
| The Stationary Peakedness Approximation (PK)              | Стационарная пиковая аппроксимация                         |
| The Average Stationary Approximation (ASA)                | Средняя стационарная аппроксимация                         |
| The Closure Approximation for Nonstationary Queues        | Замкнутая аппроксимация для нестационарных очередей        |
| The Pointwise Stationary Approximation (PSA)              | Стационарная точечная аппроксимация                        |
| The Pointwise Stationary Fluid Flow Approximation (PSFFA) | Стационарная точечная аппроксимация нестационарного потока |
| The Modified Offered Load Approximation (MOL)             | Модифицированная аппроксимация загруженности               |
| The Fixed Point Approximation (FPA)                       | Аппроксимация фиксированной точки                          |

Наибольшей эффективностью с точки зрения адекватности и наглядности, на наш взгляд, обладают модели, основанные на использовании системы нелинейных дифференциальных уравнений состояния сети  $\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt}$  (под состоянием сети понималась средняя длина очереди на интерфейсе маршрутизатора), полученных в ходе стационарной точечной аппроксимации нестационарного потока (Pointwise Stationary Fluid Flow Approximation, PSFFA). Именно с помощью этой модели возможно оценить влияние состояния интерфейса, характеристик потока и дисциплин обслуживания пакетов на динамику загруженности очереди на маршрутизаторе телекоммуникационной сети. Согласно

PSFFA, условия сохранения потока на интерфейсе маршрутизатора и метод стационарной точечной аппроксимации (Pointwise Stationary Approximation, PSA) объединены в едином нелинейном дифференциальном уравнении с целью аппроксимации нестационарных моделей на каждом интервале времени.

В рамках выбранной модели известными полагаются следующие данные:  $\lambda$  – интенсивность суммарного потока (пакетов в секунду, 1/с), поступающего в анализируемую очередь;  $\mu$  – пропускная способность интерфейса (пакетов в секунду, 1/с), выделенная данной очереди;  $\rho = \lambda/\mu$  – загруженность очереди. Согласно условию сохранения потока, скорость изменения средней длины очереди на интерфейсе маршрутизатора ТКС будет равняться разнице скоростей входящего и исходящего потоков [9]

$$\dot{x}(t) = -f_{out}(t) + f_{in}(t), \quad (1)$$

где  $f_{in}(t) = \lambda(t)$  и  $f_{out}(t) = \mu\rho(t)$  – скорость входящего и исходящего потока соответственно.

Тогда скорость изменения средней длины очереди на интерфейсе маршрутизатора ТКС примет вид

$$\dot{x}(t) = -\mu\rho(t) + \lambda(t). \quad (2)$$

При моделировании работы интерфейса системой массового обслуживания (СМО) M/G/1 (одноканальной системой массового обслуживания с пуассоновским входным потоком и произвольным распределением времени обслуживания) динамика средней длины очереди на маршрутизаторе ТКС может быть описана нелинейным дифференциальным уравнением вида

$$\dot{x}(t) = -\mu \left[ \frac{x + 1 - \sqrt{x^2 + 2C_s^2 + 1}}{1 - C_s^2} \right] + \lambda(t), \quad (3)$$

где  $C_s^2$  – квадрат коэффициента вариации распределения времени обслуживания.

В зависимости от значения коэффициента  $C_s^2$  могут определяться частные случаи модели PSFFA M/G/1 (Рис.1).

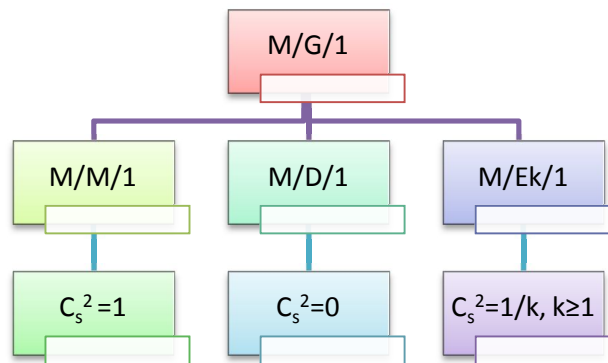


Рис. 1. Частные случаи модели PSFFA M/G/1 при различных значениях коэффициента  $C_s^2$

Таким образом, при использовании в ходе аппроксимации различных видов СМО уравнение (3) изменит свою форму:

– M/M/1: 
$$\dot{x}(t) = -\mu \left( \frac{x}{x+1} \right) + \lambda, \quad (4)$$

– M/D/1: 
$$\dot{x}(t) = -\mu \left[ (x+1) - \sqrt{x^2 + 1} \right] + \lambda, \quad (5)$$

$$- M/E_k/1: \quad \dot{x}(t) = -\mu \left[ \frac{k(x+1)}{k-1} - \frac{\sqrt{k^2 x^2 + 2kx + k^2}}{k-1} \right] + \lambda, \quad (6)$$

где параметр  $k$  определяет количество фаз обслуживания.

**3. Исследование динамики изменения загруженности очереди на интерфейсе маршрутизатора.** С помощью выбранной модели (1)...(6) произведен анализ переходных процессов относительно загруженности очередей на маршрутизаторе телекоммуникационной сети с точки зрения влияния состояния интерфейса на длительность этих процессов и на точность получаемых оценок средней длины очереди. Установлено, что на время сходимости влияли следующие основные факторы: пропускная способность интерфейса, характеристики потока (интенсивность, длина пакета), а также вид дисциплины обслуживания пакетов. Учет данных факторов производился в рамках использования следующих систем массового обслуживания: M/M/1, M/D/1 и M/E<sub>k</sub>/1, которые достаточно точно описывают реальные потоки, протекающие в современных мультисервисных ТКС [11].

На Рис. 2 представлены графики, характеризующие переходные процессы относительно загруженности очереди на интерфейсе маршрутизатора ТКС при моделировании его работы с использованием различных СМО.

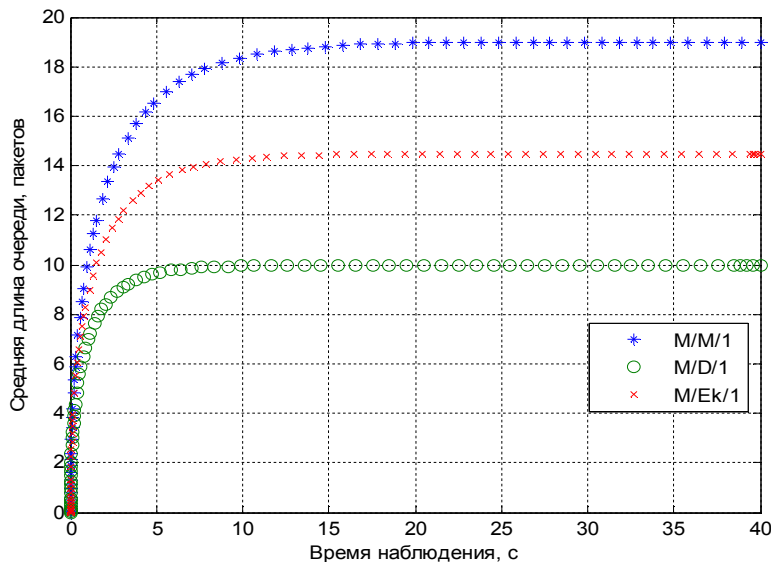


Рис. 2. Анализ сходимости средней длины очереди к своему предельному значению при моделировании работы интерфейса ( $\mu = 100$  1/с,  $\lambda = 95$  1/с)

Как видно из Рис. 2, когда работа интерфейса моделировалась СМО M/D/1, то значение средней длины очереди сходилось к своему предельному значению (10 пакетов) за 8...10 секунд. Однако если управление очередью осуществляется с периодом, например, в 100 мс, то средняя длина очереди составит приблизительно 2 пакета, что значительно (до 5 раз) отличается от значения средней длины очереди в установившемся режиме. При выборе моделей СМО M/E<sub>k</sub>/1 и M/M/1 ситуация с получением адекватных оценок оказывается более проблематичной. В первом случае процесс сходился за 13...15 сек., во втором – за 18...20 сек., что способствовало еще большей потере точности при получении искомых оценок средней длины очереди.

Кроме того, проводилось исследование влияния пропускной способности интерфейса на скорость сходимости средней длины очереди к своему предельному значению. На Рис. 3...5 представлены графики влияния изменения ПС на динамику переходных процессов относительно загруженности очереди на интерфейсе маршрутизатора ТКС при моделировании различными СМО.

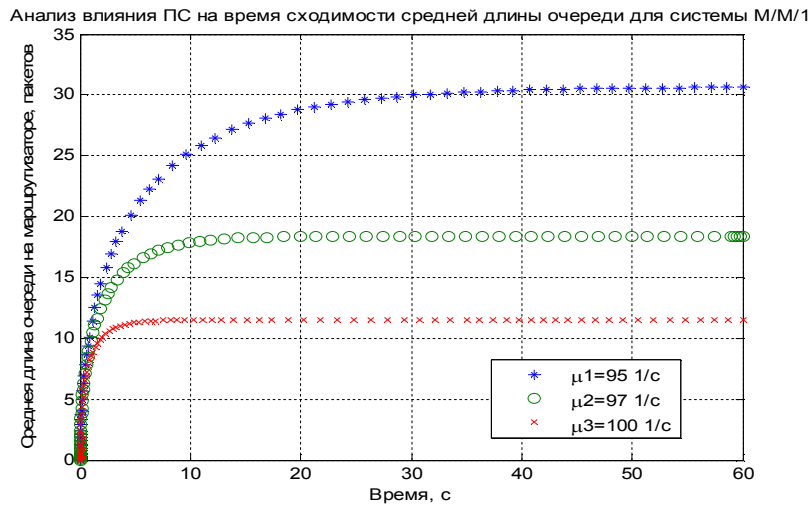


Рис. 3. Анализ влияния пропускной способности на время сходимости средней длины очереди для системы M/M/1 ( $\mu_1 = 95$  1/с,  $\mu_2 = 97$  1/с,  $\mu_3 = 100$  1/с,  $\lambda = 92$  1/с)

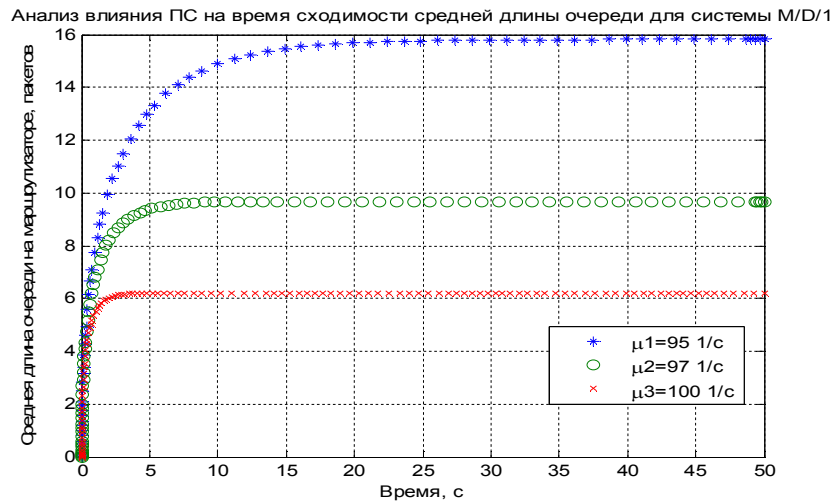


Рис. 4. Анализ влияния пропускной способности на время сходимости средней длины очереди для системы M/D/1 ( $\mu_1 = 95$  1/с,  $\mu_2 = 97$  1/с,  $\mu_3 = 100$  1/с,  $\lambda = 92$  1/с)

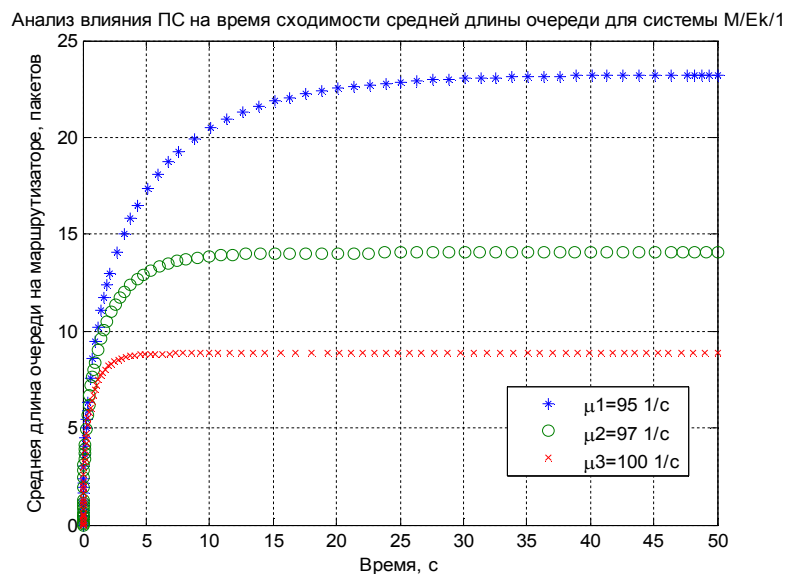


Рис. 5. Анализ влияния пропускной способности на время сходимости средней длины очереди для системы M/E<sub>k</sub>/1 ( $\mu_1 = 95$  1/с,  $\mu_2 = 97$  1/с,  $\mu_3 = 100$  1/с,  $\lambda = 92$  1/с)

При анализе в случае использования модели СМО M/D/1 при условии исходных данных, указанных на Рис. 4, было показано, что при более высокой пропускной способности интерфейса значение средней длины очереди сходилось значительно быстрее (за 2...3 секунды) к своему предельному значению (6 пакетов). Тогда как при более высокой загрузке интерфейса  $\rho_1 = \lambda/\mu_1 = 0,97$  время сходимости средней длины очереди к предельному значению порядка 37-40 секунд. Те же тенденции наблюдались и при исследовании моделей СМО M/M/1 и M/E<sub>k</sub>/1 (Рис. 3 и Рис. 5 соответственно).

Исходя из проведенного исследования, выделим основные факторы влияния на время сходимости средней длины очереди к предельному значению в установившемся режиме. Более высокая пропускная способность интерфейса маршрутизатора ТКС, а соответственно меньшая загрузка очереди, приводит к значительному уменьшению времени сходимости средней длины очереди и ее размера. Также необходимо отметить влияние закона распределения времени обслуживания потоков на интерфейсах маршрутизаторов ТКС. Среди использованных моделей СМО наилучшие показатели имеет модель M/D/1 по сравнению с моделями M/M/1 и M/E<sub>k</sub>/1 при одних и тех же исходных данных, в случае использования которой при наименьшей загрузке интерфейса время сходимости средней длины очереди порядка 2-3 секунд, тогда как другие модели имеют более длительный переходный процесс в установившемся режим (6-8 секунд). При использовании модели M/M/1 наблюдался самый длительный переходный процесс (45 секунд) при значении длины очереди 31 пакет.

#### **4. Выводы**

1) Ввиду высокой динамики изменения состояния интерфейса при оценке средней длины очереди и связанных с ней основных показателей качества обслуживания в ряде важных случаев необходимо использование динамической модели, получаемой при применении стационарной точечной аппроксимации нестационарного потока PSFFA и представленной нелинейным дифференциальным уравнением состояния, где под состоянием понималась средняя длина очереди.

2) Как показал проведенный анализ, аналитический расчет средней длины очереди на интерфейсе маршрутизатора является важным этапом в ходе решения важных задач по управлению самой очередью. Чем выше точность расчета средней длины очереди, тем обоснованнее решение по объемам отбрасываемых пакетов из нее и тем точнее, в свою очередь, можно спрогнозировать величину средней задержки и вероятность потерь пакетов на интерфейсе маршрутизатора. Использование ставших классическими выражений для расчета средней длины очереди, полученных для предельного случая, достаточно часто дает очень грубое приближение к истинным значениям. С использованием динамической нелинейной модели (1)...(6) удалось показать, что средняя длина очереди сходится к предельному значению за некоторое время, которое может составлять от единиц до десятков секунд.

3) Основываясь на полученных в работе результатах (Рис. 2...6), определено, что использовать предельные оценки при расчете средней длины очереди можно только лишь после окончания переходного процесса. В противном случае целесообразно использовать более точную дифференциальную модель (1)...(6). Как показали результаты анализа, на длительность переходного процесса влияют такие факторы как интенсивность потока, пропускная способность интерфейса маршрутизатора, дисциплина обслуживания и т.д. Причем установлено, что чем выше пропускная способность интерфейса, тем длительность переходного процесса меньше. Из множества рассмотренных дисциплин обслуживания установлено, что в случае использования модели M/D/1 сходимость средней длины очереди к предельному значению в установившемся режиме выше, чем при использовании других моделей.

4) В рамках приведенных примеров показано, что использование нелинейной дифференциальной модели позволяет улучшить точность расчета средней длины очереди от 1,5-2 до 5 раз в зависимости от состояния интерфейса и выбранной дисциплины обслуживания.

#### **Литература**

1. Vegesna S. IP Quality of Service / S. Vegesna // Cisco press, 2001. – 368 p.
2. Tsai T.-Y. Introduction to Packet Scheduling Algorithms for Communication Networks / T.-Y. Tsai, Y.-L. Chung, Z. Tsai // Communications and Networking, Jun Peng. – 2010. – 434 p.
3. Marchese M. QoS Over Heterogeneous Networks / M. Marchese // John Wiley & Sons, Ltd, 2007. – 328 p.
4. Али С. Али. Поточковая модель динамической балансировки очередей в MPLS–сети с поддержкой Traffic Engineering Queues [Электронный ресурс] / Али С. Али, А. В. Симоненко // Проблемы телекомунікацій. – 2010. – № 1 (1). – С. 59–67. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101\\_ali\\_balancing.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_ali_balancing.pdf).
5. Вавенко Т. В. Поточковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди в программно-конфигурируемых сетях / Т. В. Вавенко, В. Л. Стерин, А. В. Симоненко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 4(86). – С. 38-45.
6. Лемешко А. В. Математическая модель динамического управления каналным и буферным ресурсом на узлах телекоммуникационной сети / А. В. Лемешко, А. В. Симоненко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. – 2009. – Вып. 156. – С.36-41.
7. Барабаш О. В. Построение функционально-устойчивых распределенных информационных систем / О. В. Барабаш. – К.: НАОУ, 2004. – 226 с.
8. Alnowibet K. A. Nonstationary Erlang Loss Queues and Networks / K. A. Alnowibet // PhD Thesis, North Carolina State University, 2004. – 140 p.
9. Wei-Ping Wang, David Tipper, Sujata Banerjee. A Simple Approximation for modeling Nonstationary Queues // Proceedings of the Fifteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer Societies (INFOCOM '96). – 1996. – V.1. – P. 255–262.
10. Скопа О. О. Побудова систем мережного управління радіозв'язком / О. О. Скопа // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2002. – № 443. – С. 81-85.
11. Лемешко А. В. Разработка и исследование поточковой модели адаптивной маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях с балансировкой нагрузки / А. В. Лемешко, Т. В. Вавенко // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – №3 (29). – С. 100-108.

#### **Автори статті**

**Еременко Александра Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
Тел. +380 (63) 589 47 02. E-mail: alexere@ukr.net

**Лебеденко Татьяна Николаевна**, аспирант кафедры телекоммуникационных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Тел. +380 (50) 041 68 40.  
E-mail: tatyana\_n\_lebedenko@mail.ru

**Старкова Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и сетей, Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев.  
Тел.: +380 (67) 541 22 33. E-mail: elesta.tcs@mail.ru

Дата надходження в редакцію: 12.08.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. А. В. Лемешко