

УДК 681.5.011

Д.О. Жуковська, В.Я. Воропаєва (канд. техн. наук, доц.)
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Красноармійськ
кафедра автоматики і телекомунікацій
E-mail: vismerka@mail.ru; voropayeva@meta.ua

ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ В ГІБРИДНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

В роботі проведений аналіз та узагальнення характеристик гібридних телекомунікаційних мереж; розроблено алгоритм обробки пріоритетних черг з урахуванням факторів впливу методів управління смугою пропускання, методів визначення розмірів буфера пам'яті, методу оцінки сумарної затримки; розроблено та реалізовано в середовищі моделювання GPSS World імітаційну модель передачі інформації по гібридній телекомунікаційній мережі з використанням алгоритму пріоритетних черг. Сферою застосування є використання отриманих експериментальних даних для створення складних алгоритмів управління чергами в гібридних телекомунікаційних мережах.

Ключові слова: гібридна мережа, супутник, трафік, модель, алгоритм, управління, черга, пріоритет.

Загальна постановка проблеми. Постійно зростаючий попит на різні послуги в наш час висуває операторам зв'язку вимогу об'єднувати існуючі різні телекомунікаційні мережі для надання необхідного обсягу послуг, таких як: надання каналів передачі даних, корпоративної телефонії, доступу до глобальної мережі Інтернет, телебачення і т.д. Сучасний оператор має бути готовий надати клієнтові послуги відеозв'язку, телефонії і передачі даних, в сукупності, в будь-якій точці світу. Так виникли мультисервісні телекомунікаційні мережі за наданими послугами та гібридні телекомунікаційні мережі за використанням середовищем передачі (радіоканал – кабель, оптичний кабель – коаксіальний кабель).

Така гетерогенність сучасних телекомунікаційних мереж як за ознаками змішаності трафіку і, відповідно, вимог до параметрів QoS, так і типами та характеристиками активного та пасивного комунікаційного обладнання, що використовується для передачі цього трафіку, призводить до необхідності вирішення задач оптимального управління трафіком в гібридних телекомунікаційних мережах. Насамперед, це стосується вибору оптимального методу управління чергами для різних типів трафіку та середовищ передачі.

Постановка задач дослідження. Мета роботи – проектування і моделювання алгоритму обробки пріоритетних черг в гібридних телекомунікаційних мережах при передачі змішаного типу трафіку та оптимізація параметру затримки для мінімізації втрат. Для досягнення мети поставлені та вирішенні наступні задачі:

1. Провести аналіз особливостей гібридних телекомунікаційних мереж з точки зору задач управління трафіком.
2. Проаналізувати види затримки та розробити математичну модель процесу передачі змішаного трафіку.
3. Розробити імітаційну модель передачі інформації по гібридній телекомунікаційній мережі.
4. Реалізувати модель в середовищі моделювання GPSS World.
5. Провести оптимізацію параметра затримки.

Результати розробки та досліджень. Гібридні мережі зв'язку – це мережі, які складаються з двох або декількох типів систем зв'язку, що працюють при цьому спільно, для

надання необхідних телекомунікаційних послуг кінцевому користувачеві [1]. На сьогоднішній день існує велика кількість гібридних мереж. Одним із представників даних мереж є гібридні супутникові системи зв'язку (ГССЗ), які отримали свій подальший розвиток за рахунок спільного використання супутникового і наземного каналів зв'язку. ГССЗ є дуже гнучкою і дозволяє створювати мережі, що відповідають найжорсткішим вимогам і надають широкий спектр послуг з передачі голосу, відео, даних в будь-якій комбінації.

Будь-яка супутникова станція в загальному вигляді складається з наступних компонентів: супутникова антена (тарілка діаметром, як правило, від 0,9 до 2,4 м), приймач і передавач, що розміщуються на антені, супутниковий модем (стандартний електронний блок висотою 1-3U, який як правило має Ethernet-інтерфейс), кінцеве обладнання користувача [2].

Ще одним представником гібридних телекомунікаційних мереж є гібридні оптико-коаксіальні мережі (hybrid fiber-coax, HFC) – найбільш поширені в даний час широкосмугові мережі передачі даних. Архітектура мережі абонентського доступу з асиметричною двобічною передачею сигналів, розроблена в рамках стандарту 802.14.

Між вузлом транспортної мережі та її вторинним вузлом інформація передається по гібридним волоконно-оптичним лініям зв'язку. На вторинному вузлі сигнал з оптичної форми перетворюється в електричну і по двобічній гібридній коаксіальній мережі надходить до абонента. На первинному вузлі сигнал перетворюється в оптичну форму і передається на вторинний вузол з використанням двох волокон. По одному волокну інформація передається абоненту, по другому – від абонента. На вторинному вузлі сигнал перетвориться з оптичної в електричну форму і через коаксіальну мережу надходить на абонентські пристрої, які можуть бути самими різними [3].

Сучасні організації використовують у своїх процесах 3 види трафіку – даних (файли), транзакцій (запити до БД, локальних і розподілених) і реального часу (IP-телефонія, мультимедійний трафік, трафік технологічного рівня, SCADA, АСУТП).

Змішаним трафіком називається вхідний і вихідний трафік, що включає пакети різних типів, і, відповідно, пріоритетів. Пріоритетний трафік дозволяє оптимізувати підключений канал зв'язку і домогтися необхідних тонких налаштувань, зокрема, – надати перевагу найбільш важливим потокам трафіку і забезпечити мінімальну затримку в обслуговуванні. Даний клас трафіку буде обслуговуватися навіть за умови повної утилізації каналу зв'язку. Обмеження смуги пропускання дозволяє обмежити вибраний клас трафіку в швидкості, щоб зростання менш пріоритетного трафіку не слугувало причиною деградації більш пріоритетного. До характеристик змішаного трафіку відносяться – пропускна здатність, сумарна затримка, час відповіді, коефіцієнт вибухоподібності [4].

Одним із показників, що відноситься до важливих характеристик змішаного трафіку, є сумарна затримка при передачі інформації по гібридній супутниковій мережі. Затримка розраховується як затримка абонентського пристрою на передачі плюс затримка лінії зв'язку плюс затримка абонентського пристрою на прийомній стороні. Компоненти, що вносять затримку на стороні прийому, показані на рис. 1.

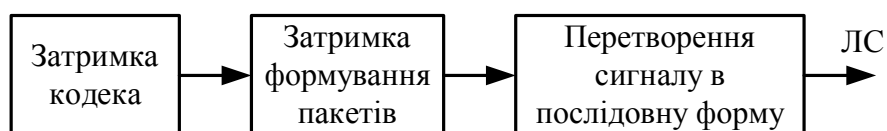


Рисунок 1 – Компоненти затримки абонентського пристрою

На прийомній стороні розраховується затримка у вихідному буфері (джиттер-буфер необхідний, щоб перетворити змінну затримку в постійну) так само, як і затримка у вхідному буфері та затримка на декодері (затримка декодера подвоюється). Сумарна затримка розраховується за наступною формулою:

$$\tau = \tau_{\text{нак}} + \tau_{\text{пер}} + \tau_{\text{розп}} + \tau_{\text{очік вих буф}} + \tau_{\text{обр}}, \quad (1)$$

де $\tau_{\text{нак}}$ – час формування пакетів, $\tau_{\text{пер}}$ – час перетворення сигналу у послідовну форму, $\tau_{\text{розп}}$ – затримка у лінії зв'язку, $\tau_{\text{очік вих буф}}$ – час очікування у вхідному буфері, $\tau_{\text{обр}}$ – час обробки пакету.

Класифікація трафіку являє собою окрему задачу. Пакети можуть розбиватися на класи за пріоритетами відповідно до типу мережного протоколу (зауважимо, що такий спосіб підходить тільки для пристроїв, що працюють на другому рівні моделі OSI), на підставі адрес одержувача та відправника, номеру порту і будь-яких інших комбінацій ознак, що містяться в пакетах. Правила класифікації пакетів згідно пріоритетних класів є складовою частиною політики управління мережею.

Пріоритети можуть призначатися не тільки комутатором або маршрутизатором, але і додатком на вузлі-відправнику. Необхідно також враховувати, що кожен мережний пристрій може не погодитися з пріоритетом, призначеним даному пакету в іншій точці мережі. У цьому випадку пристрій змінює значення пріоритету відповідно до локальної політики, що діє безпосередньо на цьому пристрої.

Надійшовши в період перевантаження, пакет поміщається в чергу згідно його пріоритету. Пріоритети черг мають абсолютний характер переваги при обробці: поки з більш пріоритетної черги не будуть вибрані всі пакети, пристрій не переходить до обробки наступної, менш пріоритетної. Тому пакети із середнім пріоритетом завжди обробляються тільки тоді, коли черга пакетів з високим пріоритетом порожня, а пакети з низьким пріоритетом – тільки коли порожні всі черги вищого рівня.

В роботі [5] авторами був проведений аналіз існуючих алгоритмів обробки черг в комутативному обладнанні, також була розроблена модель обробки пріоритетних черг, яка реалізована за допомогою імітаційного моделювання в середовищі GPSS World. Шляхом проведення різних експериментів визначено, що використання алгоритму пріоритетних черг дає змогу зменшити втрати важливої інформації, що чутлива до затримок [6]. Цим самим доведено, що даний алгоритм значно підвищує показники якості при передачі аудіо- та відеоінформації. Отже саме модель алгоритму «зважена справедлива черга» обрана для реалізації імітаційної моделі передачі інформації по гібридних телекомунікаційних мережах.

Зважена справедлива черга (Weighted fair queuing, WFQ) – механізм планування пакетних потоків даних з різними пріоритетами. Його метою є регулювання використання одного каналу передачі даних декількома конкуруючими потоками, де під потоком розуміється черга пакетів даних (змішаний трафік). Пакети приймаються з i -го порту, потім розбиваються на пріоритетні класи (високий, середній, низький) відповідно до типу мережного протоколу на підставі адрес призначення й джерела [7].

Пакет обробляється протягом певного часу, що задається системним годинником. Обробка полягає в розпізнаванні пріоритету пакету, розміщенні його в одну з $3x$ черг і обробка протягом заданого часу. Розрахунок параметрів моделі здійснюється за формулою (2), а розрахунок смуги пропускання за формулою (3):

$$\begin{cases} V_1 = VH + VC + VB; \\ PVB = VB / V_1; \\ PVH = VH / V_1 \cdot p; \\ PVC = VC / V_1 \cdot p; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} OPB = (VB - PVB)/VB; \\ OPC = (VC - PVC)/VC; \\ OPH = (VH - PVH)/VH, \end{cases} \quad (3)$$

де V_1 – об’єм переданої інформації; VH – об’єм черги низького пріоритету; VC – об’єм черги середнього пріоритету; VB – об’єм черги високого пріоритету; $PV(B, H, C)$ – коефіцієнт пропускання інформації високого, низького і середнього пріоритетів; p – пропускна здатність каналу [8].

Вхідні дані для моделювання: середній інтервал між пакетами даних – 25 од. часу; ємність накопичувачів – 20; час передачі пакету даних – 20 од. часу; час передачі підтвердження – 1 од. часу; час обробки пакету в ЦП – 2 од. часу; час штучно внесеної сумарної затримки для ГССЗ (обрано стандартний кодек G.729) – 281,3 од. часу.

Для визначення діапазонів врахованих факторів слід провести ряд експериментів: Експеримент 1: Максимальна інтенсивність вхідного високопріоритетного трафіку, при середній інтенсивності середньопріоритетного і низькопріоритетного трафіку; Експеримент 2: Середня інтенсивність вхідного високопріоритетного трафіку, при середній інтенсивності середньопріоритетного і низькопріоритетного трафіку; Експеримент 3: Максимальна інтенсивність вхідного середньопріоритетного трафіку, при середній інтенсивності високопріоритетного і низькопріоритетного трафіків [9]. На рисунку 2 приведена гістограма, де для порівняння відображена кількість не оброблених пакетів для гібридної супутникової та для оптико-коаксіальної мережі.

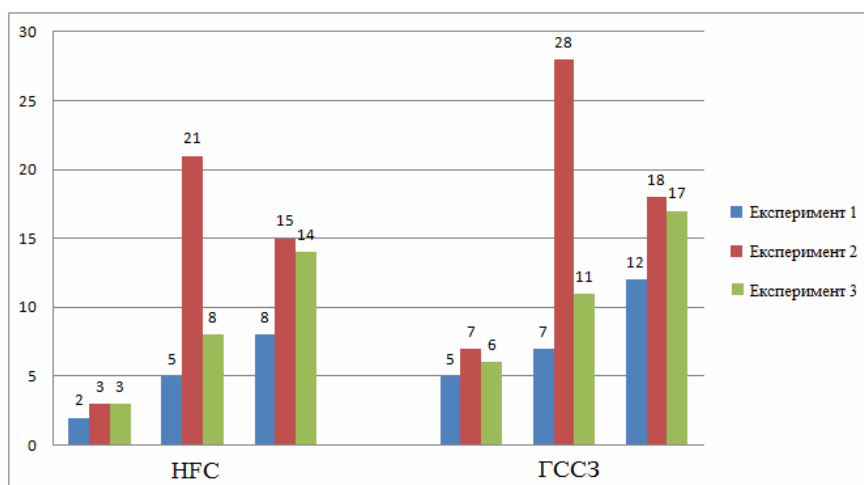


Рисунок 2 – Результати моделювання алгоритму пріоритетних черг для оптико-коаксіальної та гібридної супутникової мережі в середовищі GPSS World

З рисунка 2 видно, що при використанні алгоритму пріоритетних черг в мережі HFC: при максимальній інтенсивності вхідного високопріоритетного та середній інтенсивності середньопріоритетного і низькопріоритетного не обслугованими лишилось в сумі 15 пакетів, при середній інтенсивності вхідного високопріоритетного, середньопріоритетного і низькопріоритетного трафіку – 39 пакетів, при максимальній інтенсивності вхідного середньопріоритетного та середній інтенсивності високопріоритетного і низькопріоритетного трафіків – 25 пакетів. При використанні алгоритму пріоритетних черг в ГССЗ: при максимальній інтенсивності вхідного високопріоритетного та середній інтенсивності середньопріоритетного і низькопріоритетного не обслугованими лишилось в сумі 24 пакети, при середній інтенсивності вхідного високопріоритетного, середньопріоритетного і низько пріоритетного трафіку –

53 пакети, при максимальній інтенсивності вхідного середньопріоритетного та середній інтенсивності високопріоритетного і низькопріоритетного трафіків – 34 пакети.

Отже, щоб максимально зменшити втрати пакетів в гібридних супутникових мережах необхідно провести оптимізацію параметру затримки. Це дасть змогу максимально приблизити втрати в ГССЗ до більш надійних мереж НФС. Так як система являється дискретно-стохастичною, то математично описати її роботу досить складно. Отже, щоб вирішити оптимізаційну задачу використовується what-if аналіз – візуальний інструмент для моделювання результатів взаємодії декількох факторів. Реалізується методу відбувається перебором варіантів структури об'єкта і варіюванням значень параметрів об'єкта при заданій структурі [10]. Математична постановка моделі оптимізації виглядає наступним чином: необхідно визначити значення вектора змінних, які задовольняють обмеженням виду:

$$\begin{cases} x_i^- \leq x_i \leq x_i^+, & i \in [1, n] \\ y_j^- \leq y_j \leq y_j^+, & j \in [1, m] \end{cases} \quad (3)$$

і доставляють мінімум цільової функції:

$$Y = F(X) \rightarrow \min Y. \quad (4)$$

Під значенням Y виступає кількість не обслугованих пакетів в гібридній супутниковій мережі, під значенням X – значення затримки пакетів при передачі. Наскрізна величина затримки в телекомунікаційних мережах залежить від цілої низки факторів, але для ГССЗ найбільш вагомими вибрано: k – тип кодеку та l – висота підняття супутникової антени. Тоді вираз (4) має наступний вигляд:

$$Y = F[X(k, l)]. \quad (5)$$

Слід зауважити, що аналітичний вираз для формули (5) отримати неможливо, тому для оптимізації було використано “what-if analysis”. Кодеки мають різні характеристики, тому доцільно вибрати такий кодек, при використанні якого сумарна затримка буде меншою. Оскільки найбільшу частину сумарної затримки становить затримка в лінії зв'язку, то за параметр оптимізації доцільно взяти висоту підняття супутникової антени, яка й визначає рівень затримки. В таблиці 1 приведені значення параметрів оптимізації, які використовуються при моделюванні.

Таблиця 1 – Значення параметру затримки при застосуванні різних типів кодеків та висоти підняття супутникової антени

Висота підняття супутникової антени, м	Тип кодеку					
	G.711	G.726	G.728	G.729	G.726a	G.723.1
1	274,81	278,15	289,8	308,6	308,6	311,1
1,5	271,6	274,85	287,64	303,11	303,11	309,5
2	269,17	270,5	281,2	295,7	295,7	301,16
2,5	267,92	268,47	272,1	292,4	292,4	297,8
3	264,21	266,66	271,54	281,3	281,3	288,71

Теперведемо загальний графік кількості не обслугованих пакетів для мережі НФС та для ГССЗ після проведення оптимізації (див. рис. 3).

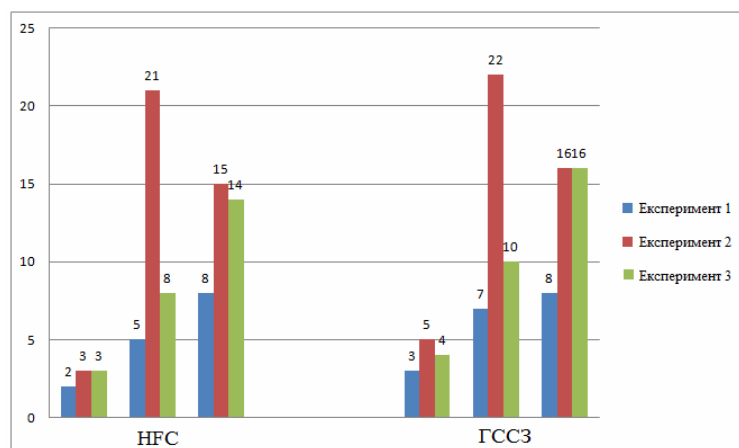


Рисунок 3 – Результати моделювання алгоритму пріоритетних черг для оптико-коаксіальної та гібридної супутникової мережі після оптимізації в середовищі GPSS World

Як видно з рисунка 3 кількість не обслугованих пакетів в гібридній супутниковій мережі максимально наблизилась до кількості не обслугованих пакетів в оптико-коаксіальній мережі. Це свідчить про правильний шлях оптимізації. Отже, можна зробити висновок, що правильно підібрані параметри побудови мережі можуть набагато знизити втрати.

Висновки.

1. Наведена порівняльна характеристика двох гібридних телекомунікаційних мереж по середовищу передачі: гібридної супутникової та оптико-коаксіальної мережі.
2. Розроблена імітаційна модель передачі інформації по гібридній телекомунікаційній мережі, яка заснована на використанні алгоритму пріоритетних черг.
3. Шляхом проведення різних експериментів проведений аналіз результатів моделювання, який показав необхідність вирішення оптимізаційної задачі. Далі була визначена оптимізаційна функція, обмеження і обраний метод, проведено три кроки оптимізації, що дозволили досягнути поставленої мети.

Список використаної літератури

1. Farserotu J. Survey of Future Broadband Multimedia Satellite Systems, Issues and Trends / J. Farserotu, R.A. Prasa // IEEE Communications Magazine. – June 2000. – P. 128 – 133.
2. Пастухов А.С. Эффективность гибридных сетей спутниковой связи VSAT в условиях самоподобия телекоммуникационного трафика: дис. ... кандидата технических наук 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций / Пастухов Алексей Сергеевич. – М., 2009. – 165 с.
3. Силин М.В. Широкополосные сети доступа с интеграцией услуг / М.В. Силин // Информационное общество. – 1999. – № 4. – С. 39 – 41.
4. Шелухин О.И. Исследование влияния самоподобия ON-OFF источников на скорость интернет трафика / О.И. Шелухин, Ю.А. Иванов, А.С. Пастухов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2008. – №1, 2. – Т.4. – С. 97 – 100.
5. Воропаева В.Я. Оцінка впливу алгоритмів обробки черг на показники QoS / В.Я. Воропаева, Д.О. Жуковська // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2014. – № 1(26). – С. 111 – 118.
6. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Е.М. Кудрявцев. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.
7. Федодеев Д. Алгоритмы управления очередями / Д. Федодеев // «Журнал сетевых решений/LAN». – 2007. – № 12. – С. 11 – 18.

8. Воропаєва В.Я. Теорія телетрафіку: навч. посіб. / В.Я. Воропаєва, В.І. Бессараб, В.В. Турупалов, В.В. Червинський. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – 202 с.
9. Корячко В.П. Корпоративные сети: технологии, протоколы, алгоритмы. / В.П. Корячко, Д.А. Перепелкин. М: Издательство: "Горячая линия-Телеком", 2011. – 216 с.
10. Алексеев Е.Б. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей / Е.Б. Алексеев, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев, под редакцией В.Н. Гордиенко и М.С. Тверецкого. – 2-е изд., испр. – М.: Издательство: "Горячая линия-Телеком", 2012. – 392 с.

References

1. Farserotu, J. and Prasa R. (2000), "Survey of Future Broadband Multimedia Satellite Systems, Issues and Trends", *IEEE Communications Magazine*, pp. 128 – 133.
2. Pastuhov A.S. (2009), "The effectiveness of hybrid networks VSAT satellite communication in terms of self-similarity of telecommunication traffic", Abstract of Ph.D. dissertation, Systems, networks and devices of telecommunications, Moscow, Russia.
3. Silin, M.V. (1999), "Broadband Integrated Services Access", *Informatsionnoe obschestvo*, no. 4, pp. 39-41.
4. Sheluhin, O.I., Ivanov Yu. A. and Pastuhov A. S. (2008), "Investigation of the influence of self-similarity ON-OFF sources on the speed of internet traffic", *Elektrotehnicheskie i informatsionnyie kompleksyi i sistemyi*, vol. 1, no. 4, pp. 97-100.
5. Voropaeva, V.Ya. and Zhukovska D.O. (2014), "Assessing the impact of processing algorithms queues indicators QoS", *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tehnichnogo universitetu. Seriya: Obchisljuvalna tehnika ta avtomatizatsiya*, no. 1(26), pp. 111-118.
6. Fedodeev D. (2007), "Queue management algorithms", *Zhurnal setevyih resheniy/LAN*, vol. 12, pp. 11-18.
7. Kudrjavcev, E.M. (2004), GPSS World. *Osnovy imitacionnogo modelirovanija razlichnyh sistem* [GPSS World. Fundamentals of simulation of different systems], DMK Press, Moscow, Russia.
8. Voropayeva, V.Y., Bessarab V.I., Turupalov V.V. and Chervyns'kyi V.V. (2011), *Teoriya teletrafiku: navch. posib.*, [Teletraffic theory: a tutorial], DVNZ "DonNTU", Donetsk, Ukraine.
9. Korjachko, V.P. and Perepelkin D.A. (2011), *Korporativnye seti: tehnologii, protokoly, algoritmy* [Corporate networks: technology, protocols, algorithms], Gorjachaja linija-Telekom, Moscow, Russia.
10. Blagodarov, A.V., Pyl'kin, A.N. and Skudnev D.M. (2011), *Modelirovanie i sintez optimal'noj struktury seti Ethernet* [Modeling and synthesis of the optimal structure of an Ethernet network], Gorjachaja linija-Telekom, Moscow, Russia.

Надійшла до редакції:
30.04.2015

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. С.В. Подкопаєв

Д.А. Жуковская, В.Я. Воропаева

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Оптимальное управление трафиком в гибридных телекоммуникационных сетях. В работе проведен анализ и обобщение характеристик гибридных телекоммуникационных сетей; разработан алгоритм обработки приоритетных очередей с учетом факторов влияния методов управления полосой пропускания, методов определения размеров буфера памяти, метода оценки суммарной задержки; разработана и реализована в среде моделирования GPSS World имитационная модель передачи информации по гибридной телекоммуникацион-

ной сети используя алгоритм приоритетных очередей. Сферой применения является использование полученных экспериментальных данных для написания сложных алгоритмов управления очередями в гибридных телекоммуникационных сетях.

Ключевые слова: сеть, спутник, трафик, модель, алгоритм, управление, очередь, приоритет.

D.A. Zhukovskaya, V.Y. Voropaeva
Donetsk National Technical University

Optimal traffic control in the hybrid telecommunication networks. Most modern routers have built-in organization priority queues, which enable them to serve in the first place certain types of traffic. Priority queues method is most often used to provide temporary guarantees for delay-sensitive applications. For transmitting audio and video with high quality it is necessary to ensure low delay and low jitter effect. This is difficult in networks without significant overhead to reserve buffer space routers and without the implementation of complex algorithms for processing queues. This work is devoted to the analysis of two hybrid telecommunication networks, namely a hybrid satellite communication system with the very small aperture terminal (VSAT) and hybrid fiber-coaxial network (HFC). The schemes are considered for constructing data networks to transmit high, medium and low priority traffic. In the hybrid telecommunications network using different technologies the percentage of lost packets is a large part of the total data traffic as the equipment is not capable to handle all packages. Therefore, it is necessary each time a packet is received to make a choice whether to accept it on processing or remove from the queue. To implement this choice each packet must have one or more criteria, on which the choice will be carried out. Also it is necessary to take into consideration technical possibility of the switching equipment, i.e. routers and switchboards of 2 and 3 levels as performance of processing of the traffic depends on it. We developed a model for the processing algorithm based on priority queues for hybrid telecommunication networks taking into account the factors influencing the methods of bandwidth management, the methods for determining the size of the memory buffer, the method estimating the total delay. The paper describes how to select a means of implementing the program model and simulation environment, experiment planning, development and tuning of model algorithm processing priority queues. Experiments were carried out using simulation GPSS World.

Keywords: network, satellite, traffic, model, algorithm, management, queue, priority.



Жуковська Дар'я Олександрівна, Україна, закінчила Донецький національний університет, асистент кафедри автоматики і телекомунікацій ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, Донецька обл., Україна). Основний напрямок наукової діяльності – оптимальне управління трафіком в гібридних телекомунікаційних мережах.



Воропасва Вікторія Яківна, Україна, закінчила Донецький національний технічний університет, канд. техн. наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, Донецька обл., Україна). Основний напрямок наукової діяльності – сучасна теорія телетрафіку, оптимізація телекомунікаційних та інформаційно-комунікаційних систем та мереж.