

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

A.Y. Gladun

THE ANALYSIS OF STOCHASTIC MODELS OF PERFORMANCE FOR WIRELESS LOCAL NETWORKS IEEE 802.11

Mechanisms of functioning at wireless local networks which are based on standards IEEE 802.11 is discussed in this paper. The model on base stochastic Petri networks is represented with view of the chosen system parameters and restrictions which do not influence performance of system, and results of calculations of performance with use of program tool system. Influence of some system parameters on functioning of a network is investigated and chosen standardized system configurations which conduct to development of effective network structures.

Розглянуті механізми функціонування в бездротових локальних мережах, які базовані на стандартах IEEE 802.11. Подана модель безпроводної мережі, на основі апарату стохастичних мереж Петрі. Досліджено вплив деяких системних параметрів на функціонування мережі та запропоновані стандартизовані системні конфігурації, які приводять до розробки ефективних мережних структур.

© А.Я. Гладун, 2006

УДК 004.75: 681.3

А.Я. ГЛАДУН

АНАЛІЗ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОДУКТИВНОСТІ БЕЗДРОВОВИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ (БЛМ) IEEE 802.11

Вступ. В останні роки бездротові мережі передачі даних стають одним з основних напрямків розвитку мережної індустрії. Бурхливий розвиток мереж цього класу в усьому світі, а також в Україні, про який свідчать як про “бездротову революцію” в області мереж передачі інформації [1, 2], завдячує наявності цілого ряду властивих їм достоїнств. До них відносяться: гнучкість архітектури мережі, забезпечення можливості динамічної зміни топології мережі при підключенні, пересуванні й відключенні мобільних користувачів без значних витрат часу; висока швидкість передачі інформації (досягає швидкості передачі дротових ЛМ); швидкість проектування і реалізації, що часто є критичним при жорстких вимогах до часу побудови мережі; високий ступінь захисту від несанкціонованого доступу; відмова від дорогої прокладки або оренди оптоволоконного чи мідного кабелю. Достоїнства бездротових технологій значною мірою визначаються тим, що в основі бездротових мереж, які функціонують у діапазоні 2,4 ГГц, лежить технологія широкосмугового або шумоподібного сигналу (ШПС). Ця технологія спочатку використовувалася для військових цілей, а в останні роки успішно застосовується в цивільних радіомережах. У рамках технології ШПС розроблені два методи використання широкої смуги частот – метод прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS) і метод частотних стрибків (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS) (табл. 1). Ці методи використовуються на фізичному

рівні і кожен з них має окремі переваги та недоліки [5].

ТАБЛИЦЯ 1. Порівняння методів DSSS и FHSS

DSSS	FHSS
Більша швидкість (на одну точку доступу)	Вища сумарна швидкість передач в одній соті
Більша стійкість до завад	Обладнання дешевше і простіше в установці
Менша потужність, менше завад іншим пристроям	Добре підходить для схем з великою кількістю незалежних передач „точка-точка”
Краще забезпечує схему „точка - багато точок”	Менша дальність
Добре підходить для побудови корпоративних та комерційних мереж	Більше шумить, менше завадостійкість
–	Краще підходить для роботи всередині приміщень

Як відомо, комп'ютерні мережі мають різні архітектурні рішення і є досить складними системами, тому задача об'єднання комп'ютерів у мережу на етапі розробки нової системи вимагає необхідних методик дослідження та проектування мережі. Крім того, необхідні засоби для передбачення її продуктивності, визначення переваг певних архітектурних рішень перед іншими, для верифікації протоколів обміну між окремими підсистемами.

Дослідження проблем БЛМ. Проблема оцінки продуктивності мереж стоується загальної проблеми підвищення якості використання всіх потенційних можливостей, закладених у обчислювальні системи. Питання аналізу якості обчислювальних систем та оптимізації їх характеристик були предметом дослідження з часів появи теорії обчислювальних систем [2, 3, 4]. У цілому, як в Україні, так і за її межами ведуться інтенсивні наукові дослідження, спрямовані на підвищення ефективності бездротових радіомереж та вибір оптимальних параметрів протоколу IEEE 802.11 [1–6]. У наявних роботах оцінка продуктивності здійснювалася шляхом імітаційного моделювання [6, 7], або за допомогою наближених аналітичних моделей [8], заснованих на допущеннях, що істотно спрощують правило визначення інтервалу затримки. Особливості методу доступу до фізичного середовища (medium access control – MAC) найбільше враховані в [4, 5], у яких розроблені аналітичні методи оцінки пропускної здатності локальної бездротової мережі 802.11 при високому навантаженні, коли до всіх станцій БЛМ завжди є непусті черги. Даний показник продуктивності оцінювався в [7] у припущенні ідеального каналу, тобто у відсутності перешкод і схованих станцій. Результати робіт [1–4, 7–9] виявляються практично незастосовними для оцінки пропускної здатності БЛМ, що орієнтуються на передачу мультимедійного трафіка. Тому мета роботи – дослідження основних механізмів функціонування БЛМ (функціонування стільникових систем є близьким до них) на основі створення моделі стохастичної мережі Петрі (СМП) та отримання кількісних характеристик продуктивності мережі при варіації різних системних параметрів.

Схема розподіленої координації в мережах IEEE 802.11. В стандарті 802.11

[5, 6] специфіковано рівень доступу до фізичного середовища MAC і фізичний рівень (PHY) для БЛМ (смуга частот 2,4–2,5 ГГц). Фундаментальний механізм доступу в 802.11 використовує модифікований протокол, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), чи Distributed Coordination Function (DCF). CSMA/CA намагається уникнути колізій шляхом використання явного підтвердження пакета (ACK), який означає, що приймаюча станція посилає ACK пакет для підтвердження того, що пакет отриманий неушкодженим.

MAC є варіантом CSMA (carrier sense multiple access) множинного доступу з виявленням несучої і відомий під назвою – розподілена функція координації (DCF, distributed coordination function). Стандартом запропоновано дві версії DCF: основний доступ (basic access), що базується на двосторонній процедурі встановлення зв'язку та доступ RTS/CTS (request-to-send/clear-to-send), що базується на чотирьохканальній процедурі встановлення зв'язку (рис. 1). В обох випадках тільки перший пакет повинен боротися за середовище. Доступ станцій до середовища ґрунтується на двох періодах часу (часових інтервалах): перший – DIFS (DCF interframe space), тобто DCF міжкадровий інтервал, другий – SIFS (short interframe space), тобто короткий міжкадровий інтервал. DIFS – міжкадровий інтервал, що використовується, як мінімальна затримка для асинхронних кадрів, які змагаються за доступ. SIFS – мінімальний міжкадровий інтервал, що використовується для усіх негайних відповідей у каналі. Причому, $SIFS < DIFS$.

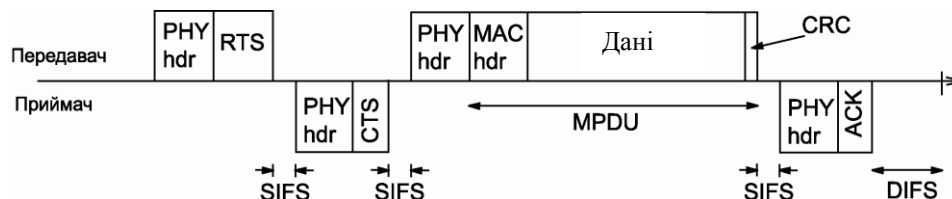


РИС. 1. Успішне встановлення зв'язку для методу RTS/CTS

У методі RTS/CTS існує ще два пакети: RTS – містить інформацію про довжину кадру і CTS – пакет, що є підтвердженням для того ж самого пакета RTS. SIFS – це проміжки між послідовними передачами. Від інформації, що знаходиться в пакетах RTS і CTS, інші станції можуть бути поінформованими, як довго середовище буде зайнятим. Є дві причини щоб використовувати більш складний механізм RTS/CTS. Коли тільки короткі пакети RTS борються за середовище, то для процедури зіткнення витрачається менше смуги пропускання. Випадковий інтервал відстрочки при зіткненні обирається у такий спосіб:

$$BackoffTime = Random() \times aSlotTime,$$

де *BackoffTime* – час відстрочки; *Random()* – випадкове число, яке генерує генератор випадкових чисел; *aSlotTime* – випадковий дискретно-разовий інтервал відстрочки, який вибирає станція відразу після виникнення колізії. Цей таймер зменшується, коли середовище вільне.

Процедура відстрочки показана на рис. 2. Станція 1 і 2 мають намір передати кадр. Після закінчення попередньої передачі, станція 2 очікує деякий інтервал DIFS і потім вибирає час відстрочки рівний 6 перед посилкою наступного кадру. Тим часом, станція 1 прослуховує вільний канал протягом DIFS і потім передає кадр. На протязі передачі станція 2 зупиняє зменшення свого таймера відстрочки. Однак, він зменшується знову, коли канал виявив незанятість каналу протягом DIFS. Критичним параметром протоколу є *уразливий період*. Він складається з часу поширення в ефірі (*aAirPropagationTime*), часу, який потрібен одержувачу для того, щоб розпізнати сигнал (*aCCATime*) і час, який необхідний для перемикання з одержання на передачу (*aRxTxTurnaroundTime*).

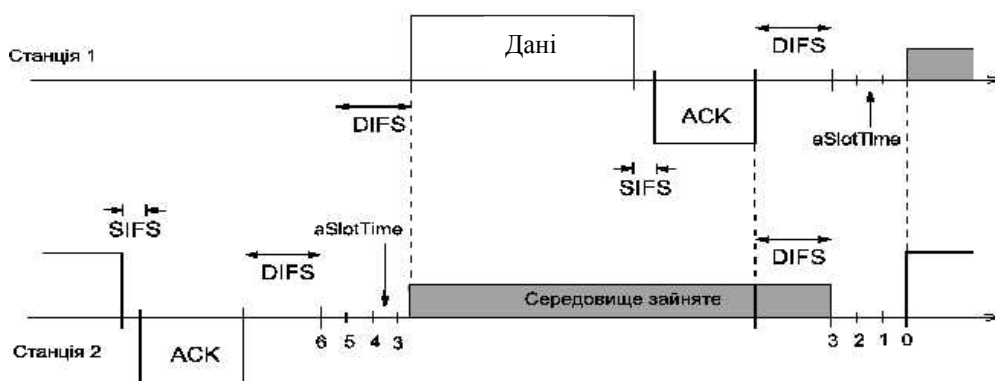


РИС. 2. Процедура відстрочки з основним механізмом доступу

Стандарт визначає три різні фізичні рівні (PHY): метод прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS), метод частотних стрибків (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) та інфрачервоний (IR). Ці методи кардинально відрізняються і є несумісними один з одним. На рис. 2 видно, що ми нехтуємо ефектами уразливого періоду. Значення специфіковані для фізичного рівня, отримані зі стандарту (для DSSS й FHSS тільки) представлені в табл. 2.

ТАБЛИЦЯ 2. Параметри, які залежні від фізичного середовища [5]

Параметри	DSSS	FHSS
aSlotTime	20 мкс	50 мкс
aCCATime	≤ 15 мкс	27 мкс
aRxTxTurnaroundTime	≤ 5 мкс	20 мкс
SIFS	10 мкс	28 мкс
DIFS	50 мкс	128 мкс
aCWmin	31	15
aCWmax	1023	1023
PHYHeader	192 біт	128 біт
MaxFrameBody	8157 байт	4061 байт

Системні параметри незалежні від фізичного рівня: $a_{AirPropagationTime} = 1 \text{ мкс}$ (приймаючи максимальну відстань 200 м), $MACHeaderCRC = 272 \text{ біти}$, $ACK = 112 \text{ біт}$, $RTS = 160 \text{ біт}$, $CTS = 112 \text{ біт}$, час очікування = 300 мкс, мінімальна швидкість передачі інформації в бітах 11 Мбіт/с. Ми також приймаємо ідеальні умови каналу, тобто, проблему прихованості терміналу й загасання (короткострокові коливання якості каналу) не розглядаються.

Стохастичні мережі Петрі. Представляють основу для оцінки продуктивності й надійності різних видів систем [10, 11]. Вони використовуються для моделювання кількісних аспектів розподілених систем, у сфері інформатики, комунікацій і виробництва. СМП особливо добре придатні для того, щоб моделювати системи з паралельними й синхронізованими діями [11]. Зазвичай робоче навантаження, згенероване джерелами трафіка даних є недетермінованим і стохастичним по своїй природі. Дані можуть передаватися в різні моменти часу і вони можуть бути різних обсягів, а деколи потік даних може приймати вибуховий характер. Традиційно, системи організації черг використовувалися для прикладного стохастичного моделювання в цих сферах. Їхня сила – це ефективне аналітичне рішення широкого класу моделей. Однак, недоліками систем організації черг вважають саме недостатність описової потужності для адекватного відображення таких явищ, як синхронізація або блокування. Для опису цих та інших особливостей розподілених систем, СМП є найбільш придатними [10, 11].

Побудова детальної моделі СМП. Розглянемо детальну модель СМП, що відображає процеси функціонування фундаментального механізму доступу до фізичного середовища в IEEE 802.11. На рис. 3 показана підмережа Петрі для однієї станції безпроводної локальної мережі¹. Позиції *vuln* і *busy* є глобальними: підмережа Петрі кожної станції пов'язана одна з одною за допомогою цих двох позицій однаковою способом. Це означено численними крапками на рис. 3. Значення кожної позиції і переходу пояснено в табл. 3. Більш докладніші пояснення окремих переходів подані в [6].

Позиція *free* моделі моделює вільний буфер для розміщення кадрів на MAC-підрівні станції. Максимальне число кадрів, які станція може розмістити, установлене в *N* (як певна кількість маркерів). Експонентний перехід *gen* моделює надходження блоків даних від більше високих протокольних рівнів, позиція *wait* моделі буферизує кадри, що чекають передачі. Решта позицій та переходів СМП, що залишилися, моделює канал доступу та передачу кадрів і може, таким чином, розглядатися як модуль обслуговування цієї черги.

Маркери з позиції *wait* можуть надходити в інші підмережі Петрі, при наявності маркера у позиції *idle* або *fin*. Якщо станція не змогла одержати доступу до каналу деякий час, то маркер перебуває у позиції *idle* і потім активізується перехід *first*, який виштовхує маркер у позицію *sense* (прослуховування каналу);

¹ Для назви позицій та переходів використані латинські букви, як того вимагає опис вхідних даних (моделі СМП) для програмного пакета TimeNET на якому виконувався процес розрахунку кількісних параметрів продуктивності [12].

інакше активізується наступний перехід consecutive і вставляється маркер у позицію Pbackoff (запуск процедури відстрочки).

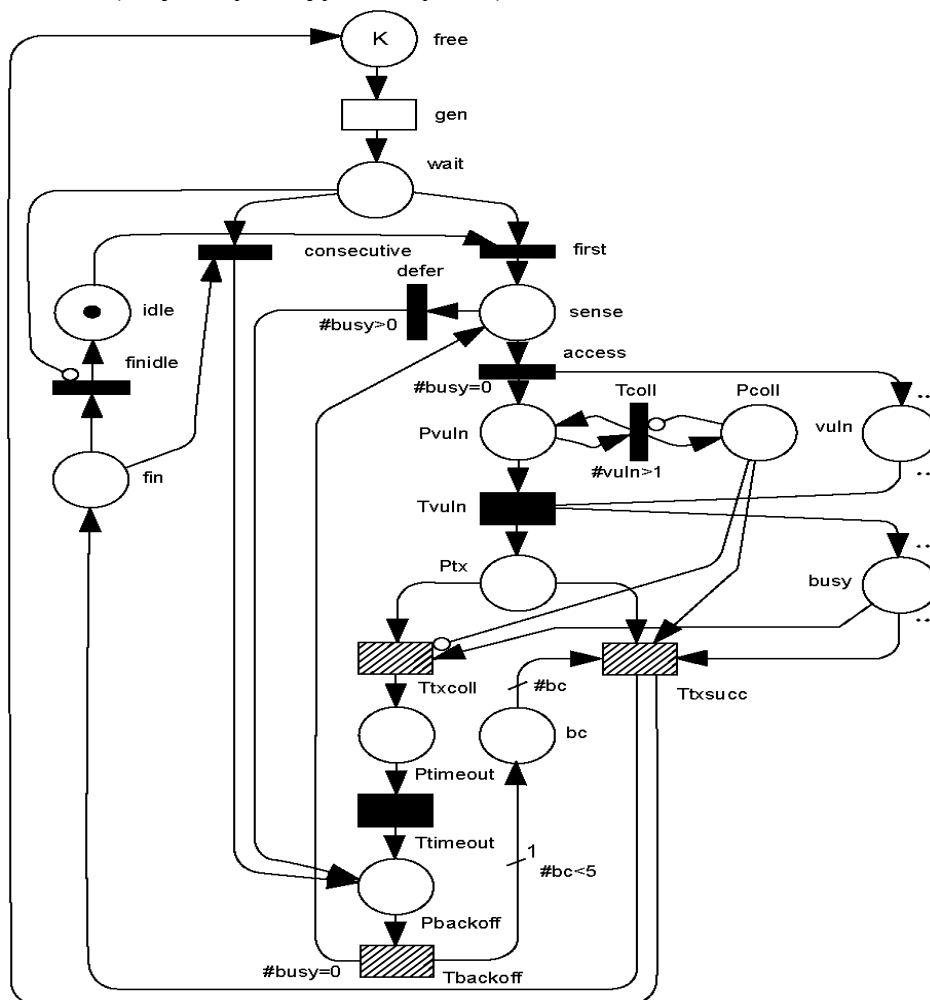


РИС. 3. Детальна СМП модель бездротової локальної мережі IEEE 802.11

Маркери в позиції busy представляють число запитуваних станціями передач. Згідно з передбаченим механізмом захисного блокування (в методі доступу), один з безпосередніх переходів defer і access відкривається і доступ дозволяється. Спочатку один маркер вштовхується в позицію Pbackoff (запуск процедури відстрочки), а потім інший маркер вштовхується в позицію Pvuln (запуск передачі в несприятливий (уразливий) період). Зіткнення (конфлікт) відбудеться, якщо в цей період будь-яка інша станція спробує одержати доступ до середовища. Число передач у несприятливий (уразливий) період, представлений маркерами в позиції vuln. (Інформацією щодо просторового розподілу станцій мож-

на знехтувати, оскільки затримка поширення сигналу є досить короткою у порівнянні з іншими частинами уразливого періоду). Зіткненню відповідає наявність більш ніж одного маркера в позиції *vuln*. У цьому випадку (при зіткненні) наступний перехід *Tcoll* активізується й заштовхує в позицію *Pcoll* маркер, що служить пам'яттю про те, що зіткнення відбулося. Особливістю цієї моделі є те, що виявлення зіткнення й пам'ять про зіткнення – це певна модель штучного механізму", що була використана в моделі. У реальній мережі станція не знає, що зіткнення відбулося.

Тривалість уразливого періоду представлена детермінованим переходом *Tvuln*. Незалежно від того, чи дійсно є маркер у позиції *Pcoll*, сумарний перехід *Ttxcoll* або *Ttxsucc* є дозволим. Час активізації переходу *Ttxsucc* відображає тривалість успішного обміну послідовністю кадрів на основі використовуваної технології (або базовий доступ або RTS/CTS), включаючи необхідні міжкадрові інтервали: SIFS – між кадрами, DIFS – після завершального кадру АСК. У відповідності до цього, тривалість активізації переходу *Ttxcoll* розрахована тільки на кадр, що претендував (боровся) за середовище (відповідно, пакет даних або RTS) плюс DIFS. В обох випадках час *aCCATime*, що є, компонентом уразливого періоду, повинен бути віднятим від часу тривалості активізації переходів *Ttxcoll* та *Ttxsucc*.

ТАБЛИЦЯ 3. Інтерпретація СМП моделі (рис. 3)

Елементи СМП	Інтерпретація моделі
<i>free</i>	буфер станції вільний
<i>gen</i>	надходження корисного навантаження (даних) на MAC-підрівень
<i>wait</i>	буферизований кадр (надходження кадру в буфер)
<i>consecutive, first</i>	послідовна (один за одним) або перша передача кадру
<i>sense</i>	прослуховування (виявлення) каналу
<i>access</i>	запуск процедури доступу до фізичного середовища
<i>defer</i>	відстрочка доступу, повернення у вихідне положення
<i>Tvuln, Pvuln</i>	уразливий період
<i>vuln</i>	число станцій в уразливий період
<i>Tcoll, Pcoll</i>	зіткнення кадрів (колізія)
<i>Ptx</i>	передача, що виявлена іншими станціями
<i>busy</i>	число запитуваних станцією (неуспішних) передач
<i>Ttxcoll, Ttxsucc</i>	тривалість зіткнення й тривалість успішних передач
<i>Ptimeout, Ttimeout</i>	витікання (завершення) тривалості часу АСК або CTS
<i>Pbackoff, Tbackoff</i>	процедура відстрочки до наступної спроби
<i>bc</i>	лічильник відстрочок
<i>fin</i>	закінчення процедури доступу до середовища після успішної передачі кадру
<i>finidle</i>	непослідовна передача (одиначний кадр)
<i>idle</i>	станція не має кадрів, що очікують на передачу

Ми проаналізували, що доповнення інтервалом DIFS у кінці часу передачі кадру спрощує моделювання виявлення каналу, в іншому випадку, перехід

access повинен бути синхронізованим (розрахованим). Активізація Ttxcoll заштовхує маркер у позицію Ptimeout, потім активізація переходу Ttxsucc виштовхує маркер до позицій free та fin.

Детермінований перехід Ttimeout моделює закінчення часу АСК або CTS, як доречний факт, просуває маркер, для того, щоб розмістити його в позиції Pbackoff. Розгалужений перехід Tbackoff, що спрацьовує щоразу, коли захисне блокування #busy = 0 не встановлене, моделює процедуру відстрочки. Після активізації переходу Tbackoff, маркер повертається до позиції sense і лічильник відстрочок bc обновлюється (коректується). Перехід Tbackoff має значне розгалуження дуг і його спрацьовування є залежним від наявності маркерів у позиціях пов'язаних з цим переходом.

Висновки. На основі отриманих результатів можна зробити наступні висновки, що стосуються дослідження питань функціонування, проектування та розробки БЛМ стандарту IEEE 802.11:

- на основі чисельних експериментів порівняно різні MAC механізми та досліджено вплив деяких системних параметрів на функціонування мережі;
- погіршення пропускну здатності спостерігається при використанні основного механізму доступу й незначне погіршення спостерігається при використанні механізму RTS/CTS;
- технологія FHSS досягає більш низької продуктивності ніж технологія DSSS, імовірно через більшу тривалість уразливого періоду;
- як видно з отриманих результатів, що тільки більші кадри можуть використовувати канал ефективно. Особливо це стосується методу RTS/CTS, який є небагато гіршим для маленьких кадрів. Методика розрахунків може використовуватись як для різних варіантів архітектур мобільних мереж IEEE 802.11;
- розгляд різних архітектурних рішень підтвердив, що стандартизовані системні конфігурації ведуть до розробки ефективних мережних структур. Такі попередні розрахунки продуктивності систем необхідні на етапі передпроектних досліджень, тому що вони дають змогу проектувальникам обґрунтувати методи реалізації комп'ютерної мережі.

Слід зазначити, що область застосування аналітичних моделей мереж черг значною мірою обмежується через припущення про експонентний характер обслуговування, оскільки в комп'ютерних мережах функції розподілу, часу обробки й передачі по каналах зв'язку є відмінними від експонентних.

Незважаючи на досягнутий деякий прогрес у теорії проектування комп'ютерних мереж, ця перспективна область залишає простір для розробки нових математичних методів та подолання недоліків відомих [12]. Особливо це стосується області побудови моделей комп'ютерних мереж, що є скоріше мистецтвом, ніж наукою.

Перспектива робіт у цьому напрямку передбачає виконання робіт по вдосконаленню існуючого інструментального програмно-технологічного комплексу PetriNet [8, 9, 12] для автоматизації задач аналізу продуктивності мереж та використання не експоненційних функцій, що описують розподілення імовірності переходів в моделях СМП. Не експоненційні функції дозволять побуду-

вати більш адекватну модель, що в свою чергу дозволить отримати більш точні результати, які необхідні для аналізу продуктивності мереж з мультимедіа за стосунками.

Складність та висока вартість сучасних перспективних телекомунікаційних систем (ТС) не дозволяють обмежувати роботу з формування їхньої архітектури, вибору основних конструктивних параметрів і оцінки характеристик лише на інженерній інтуїції. При розробці перспективних або модернізації існуючих систем потрібно попередній об'єктивний аналіз [13–15] для обґрунтування розглянутих проектів та пропозицій з погляду їхніх техніко-економічних показників.

1. Столингс В. Беспроводные линии связи и сети: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с.
2. Шиллер Й. Мобильные коммуникации. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 384 с.
3. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ. – М.: Наука, 1992. – 367 с.
4. Вишневикий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
5. IEEE 802.11: IEEE Standard for Wireless LAN – Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. ANSI/IEEE Std 802.11, 2004 Edition.
6. Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, IEEE, 2004.
7. Гладун А.Я., Точилін В.В. Розробка програмно-інструментальних систем проектування та аналізу комп'ютерних мереж // Матеріали X Міжнар. наук. практ. конф. „Інформаційні технології в економіці, менеджменті і бізнесі, ЄУ. – К., 2004. – С. 47–58.
8. Гриценко В.И., Гладун А.Я. О применении временных и стохастических сетей Петри в задачах оценки производительности высокоскоростных сетей связи // Кибернетика и вычислительная техника. – 1999. – Вып. 103. – С. 102–109.
9. Гладун А.Я., Проценко О.І. Аналіз моделей процедур хендвера в бездротових мережах, базованих на технологіях АТМ // Наукові записки, сер. Комп'ютерні науки, НаУКМА, 2003. – 21. – С. 85 – 95.
10. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 212 с.
11. Мурата Т. Сети Петри: Свойства, анализ, приложения, ТИИЭР. – 1989. – 77, № 4. – С. 18–52.
12. Гладун А.Я. Моделювання комп'ютерних мереж на основі інструментально-програмних засобів. Навч. посіб.. – К.: Вид-во Європ. ун-ту, 2004. – 112 с.
13. Baldi P., Frascioni P., Smyth P. Modeling the Internet and the Web. Probabilistic Methods and Algorithms. – John Wiley, New York, 2003. – 285 p.
14. Гладун А.Я., Точилін В.М. Моделі стохастичних мереж Петрі в задачах оптимізації QoS комп'ютерних мереж // Матеріали Междунар. науч. конф. «Моделирование и исследование устойчивости динамических систем» DSMSI-2005, КГУ, 2005. – С. 78–79.
15. Гладун А.Я., Точилін В.М. Вероятностные методы моделирования и анализ производительности Web-сервисов в Internet // Тр. Междунар. конф. по математическому моделированию МКММ-2005, Феодосия, 2005. – С. 363–368.

Получено 12.05.2005