

УДК 621.324

О.В. Воробйов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

## МОДЕЛЮВАННЯ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКУ СИНТЕЗОМ АНСАМБЛЮ СТОХАСТИЧНИХ КВАЗІПЕРІОДИЧНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ON/OFF-МОДЕЛІ

*На основі аналізу причин виникнення властивості самоподібності у трафіку телекомунікаційних мереж запропоновані моделі самоподібного трафіку, проведений аналіз статистичних характеристик у порівнянні зі статистичними характеристиками реального мережевого трафіку.*

*самоподібність, трафік, телекомунікаційні мережі, статистичні характеристики другого порядку, моделювання, квазіперіодичне джерело*

### Вступ

Досвід локальних війн на Близькому Сході і Східній Європі показав, що сучасна тактика ведення бойових дій має характерною рисою значне збільшення обсягів інформації як на етапі підготовки, так і в безпосередньо в ході бойових дій, що веде до навантажень в системах передачі даних (СПД) автоматизованих систем управління військами (АСУВ) [1].

Враховуючи ці особливості розробку нових автоматизованих засобів бойового управління природно створювати на основі сучасних інформаційних технологій. Сучасне програмне забезпечення в поєднанні з мережними та телекомунікаційними технологіями дозволяє дуже ефективно вирішувати чисельні завдання, які встають при автоматизації процесів управління силами та засобами Збройних Сил України [2].

Сучасна розподілена телекомунікаційна мережа (ТКМ) – це об'єкт високої структурної складності, теорія побудови якої перебуває на стадії становлення. Спочатку теорія трафіка базувалася на класичній теорії масового обслуговування і достатньо повно описувала процеси, які відбуваються в системах передачі інформації, що використовують принцип комутації каналів. Але із розвитком ТКМ і появою мереж із пакетною передачею даних, які стали все більше витісняти мережі із комутацією каналів, виявилось, що трафік сучасних мереж має абсолютно іншу структуру, ніж прийнято в класичній теорії. Зокрема було встановлено, що трафік такої мережі володіє властивістю «самоподібності», тобто виглядає якісно однаково при майже будь-яких масштабах часової осі, має пам'ять, післядію та характеризується високим ступенем пачковості. [3, 4].

**Постановка проблеми і аналіз літератури.** Аналіз робіт [6 – 10], що стосуються самоподібності трафіку в телекомунікаційних мережах, показав, що до теперішнього часу немає повної фізичної моделі самоподібного трафіку і аналізу причин, які його викликають.

Як з'ясувалось, для такого трафіку методи розрахунку, які базуються на пуассонівських моделях та формулах Ерланга, дають невиправдано оптимістичні рішення та призводять до недооцінки реального навантаження.

Таким чином, сформувалася проблема самоподібності телетрафіка, що включає наступні невирішені завдання:

- фактично відсутня суворотна теоретична база, яка прийшла б на зміну класичній теорії масового обслуговування при проектуванні сучасних систем розподілу інформації з самоподібним трафіком;
- немає єдиної загальноновизнаної моделі самоподібного трафіку;
- не існує достовірної і визнаної методики розрахунку параметрів і показників якості систем розподілу інформації при впливі ефекту самоподібності;
- відсутні алгоритми і механізми, що забезпечують якість обслуговування в умовах самоподібного трафіку

Враховуючи те, що функціонування сучасної розподіленої мережі, яка є основою для створення АСУВ, має всі переваги і недоліки сучасних багаторівневих телекомунікаційних мереж, то ефективність її функціонування визначається, в тому числі, і точністю прогнозу поведінки мереженого трафіку. Отже, для підвищення ефективності функціонування ТКМ ДС необхідно вирішити задачу моделювання і прогнозування поведінки трафіка в мережі.

Складність розуміння принципів, які можуть привести до самоподібності трафіку в мережі, в основному визначається тим, що не існує одного чинника самоподібності. Тому задача фізичного моделювання трафіка і аналіз можливих чинників виникнення самоподібності трафікового процесу є **актуальною**. [5]

**Метою даної статті** є аналіз причин виникнення самоподібного трафіка, моделювання цього процесу і порівняння результатів із реальним трафіком.

## Основна частина

**Моделювання самоподібного трафіку на основі ансамблю квазіперіодичних джерел.** Перелічимо деякі з основних чинників, які можуть продукувати в мереженому трафіку фрактальні стохастичні процеси різних видів:

- поведінка користувача;
- генерація структури і пошук даних;
- об'єднання трафіку;
- засоби управління мережею;
- механізми управління, заснований на зворотному зв'язку;
- розвиток мережі.

Аналіз цих чинників представлений у [5]. Більш детально зупинимося на механізмі управління. Так, наприклад, метод AMID, що застосовується в TCP, передбачає постійне зростання навантаження на мережу з метою визначення граничного значення пропускної спроможності.

Таким чином, вживаний в TCP метод AIMD наказує постійне лінійне збільшення навантаження на мережу з метою визначення моменту початку перевантаження. Внаслідок цього мережа постійно знаходиться або в стані перевантаження, або в стані

виходу з нього. Це негативно позначається на з'єднаннях у вигляді збільшеного середнього RTT, великої дисперсії вимірюваних значень RTT, постійній наявності втрат, за допомогою яких мережа сигналізує про початок перевантаження. Як видно з графіків на рис. 1, ці зміни швидкості схожі на коливання і їх можна апроксимувати періодичною функцією. Тобто, фактично, можна говорити про періодичність або точніше про квазіперіодичність процесу, яка обумовлена роботою протоколу по управлінню навантаженням.

Таким чином, кожне парціальне джерело мережі можна моделювати квазіперіодичним сигналом із значеннями амплітуди і частоти – еквівалентними статистичним параметрам трафіку парціального джерела при постійному навантаженні.

Це необхідно для підтвердження припущення про наявність квазіперіодичної складової в сумарному трафіку і її впливу на формування самоподібного трафіку.

Приклад моделювання в середовищі MATLAB квазіперіодичних сигналів еквівалентних коливанням швидкості потоку в залежності від часу зображені на рис. 1.

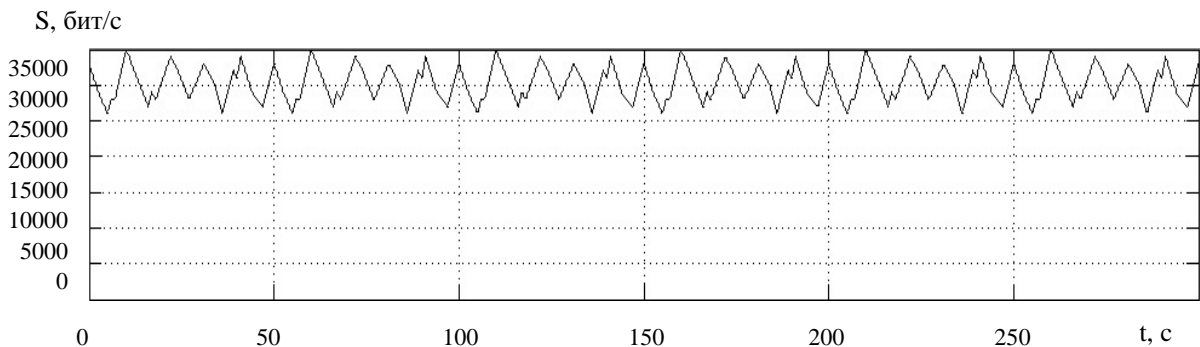


Рис. 1. Моделювання парціального квазіперіодичного сигналу (еквівалент для швидкості 32 Кбит/с)

Як зазначено в [5], формула розрахунку коефіцієнта варіації сумарного процесу в магістральному каналі дає великі погрішності (в кілька сотень відсотків), в залежності від збільшення кількості парціальних джерел. Тобто формула, за якою можливо побачити згладжування сумарного Пуассонівського процесу для самоподібного процесу, не працює.

Крім того, самоподібний процес характеризує наявність масштабної інваріантності. При агрегуванні такого процесу також не відбувається його згладжування при будь-якому часовому масштабі. Це стосується, в першу чергу, статистичних характеристик процесу, але і візуально можливо дати оцінку. На рис. 2 зображені деякі з послідовностей, отримані на основі ансамблю квазіперіодичних джерел: а – не агрегований, б і в – агреговані процеси з блоками агрегування 10 і 100 відповідно. При моделюванні самоподібного трафіку кількість

парціальних джерел обиралася більше 30. На базі цих джерел зі значенням ефективної пропускної спроможності каналу окремого пульсуючого джерела (від 32 до 256 кБіт/с), які відрізняються один від одного лише тільки своєю стохастичною фазою, було проведено генерацію сумарного трафіку. Очевидно, в процесі агрегування згладжування процесу не відбувається. Але цього недостатньо для підтвердження припущення про самоподібність процесу. Необхідно провести аналіз статистичних характеристик другого порядку процесу.

На рис. 3 зображена розроблена схема моделювання самоподібного трафіку. Основною складовою схеми є: генератори квазіперіодичних послідовностей, генератори, оператори зсуву стохастичної фази сигналів, суматори, а також блоки відображення результатів моделювання та блоки запису цих результатів в робочу область середовища MATLAB.

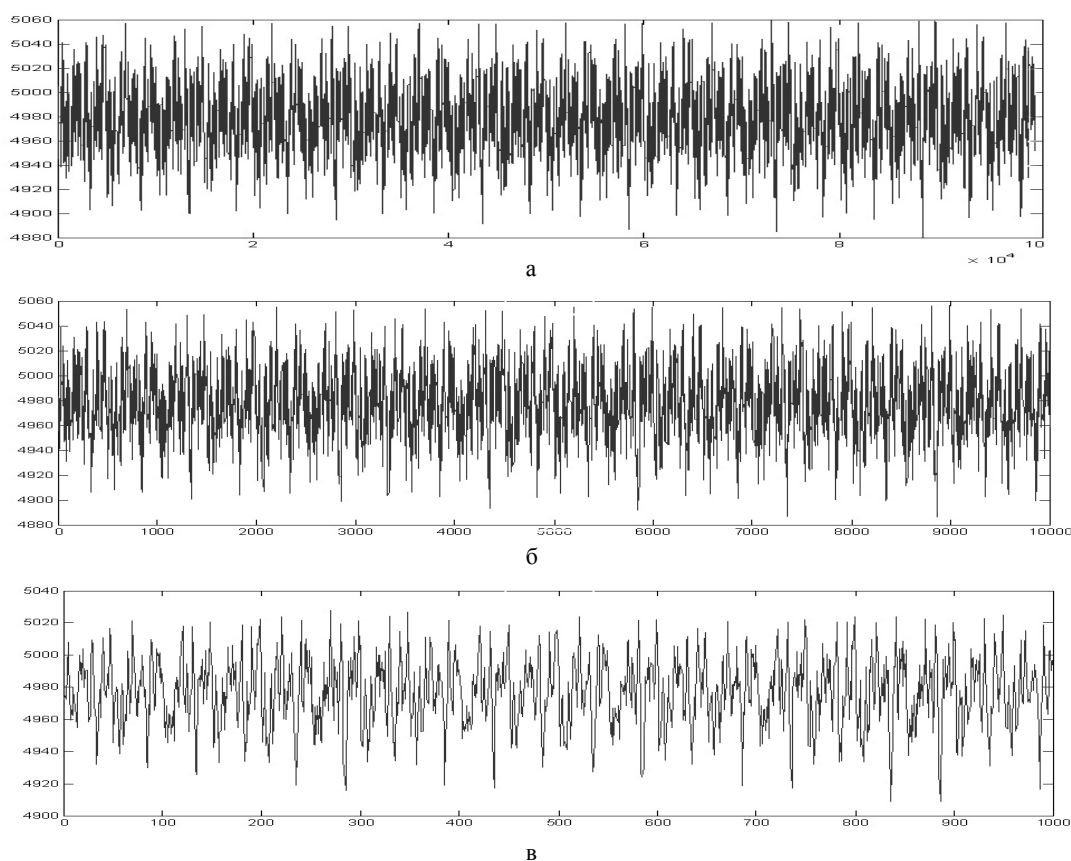


Рис. 2. Модель трафіку на основі ансамблю квазіперіодичних джерел з блоками агрегування  $m$ :  
а –  $m = 1$ ; б –  $m = 10$ ; в –  $m = 100$

Фактично схема має три основні складові підсхеми: формування квазіперіодичних послідовностей; формування ON/OFF-моделі; синтезу ON/OFF-моделі та моделі, побудованої на основі ансамблю квазіперіодичних джерел (АКД).

Результати моделювання, тобто отримані послідовності, записуються у робочу область, де далі проводиться розрахунок статистичних характеристик, побудова відповідних графіків. Важливою рисою схеми є простота, можливість масштабування, тобто розширення її за допомогою лише введення додаткових стандартних блоків – суматорів та операторів зсуву.

Як вже зазначалося, для підтвердження припущення щодо самоподібності отриманої на основі ансамблю квазіперіодичних джерел моделі трафіку необхідно провести його статистичний аналіз, так як властивість масштабної інваріантності стосується саме статистичних характеристик процесу до другого порядку а також наявності тривалої пам'яті – залежності що убуває повільно АКФ. Виразення розрахунку АКФ для безперервного процесу  $X_T(t)$  має вигляд:

$$C_{X_T}(\tau) = M\{(X_T(t) - m_{X_T})(X_T(t + \tau) - m_{X_T})\} = \frac{1}{T^2} \int_{t-T}^t \int_{t-T+\tau}^{t+\tau} C_{\xi}(u_1 - u_2) du_1 du_2. \quad (1)$$

за умови, що  $\xi(t)$  – стаціонарний в широкому сенсі випадковий процес з математичним очікуванням  $m_{\xi}$ , кореляційною функцією  $C_{\xi}(\tau)$  і спектральною щільністю  $F_{\xi}(\omega)$ . процесу на виході системи з повною пам'яттю відповідає процедура усереднювання на інтервалі  $[0, t]$  [5]

$$u(t) = \frac{1}{t} \int_0^t f(\tau) d\tau. \quad (2)$$

В процесі агрегування процесу фактично він квантується. Тому в середовищі MATLAB була розроблена програма розрахунку АКФ за формулою:

$$r(k) = \frac{1}{N - \tau} \cdot \frac{\sum (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{\sigma^2(X)}, \quad (3)$$

де  $\bar{X}$  – вибіркове середнє ряду  $X$ ,  $\sigma^2(X)$  – вибіркова дисперсія ряду  $X$ ,  $k \in Z = \{0, 1, 2, \dots\}$ .

На рис. 4 у якості прикладу показані результати розрахунків АКФ та гістограм одного із змодельованих процесів з 44 джерел і його агрегованих з різним шагом реалізацій (приклад агрегування показаний на рис. 3) для тривалості по вісі часу процесу у 10000 відліків. Сірою смужкою на гістограмах показане середнє значення.

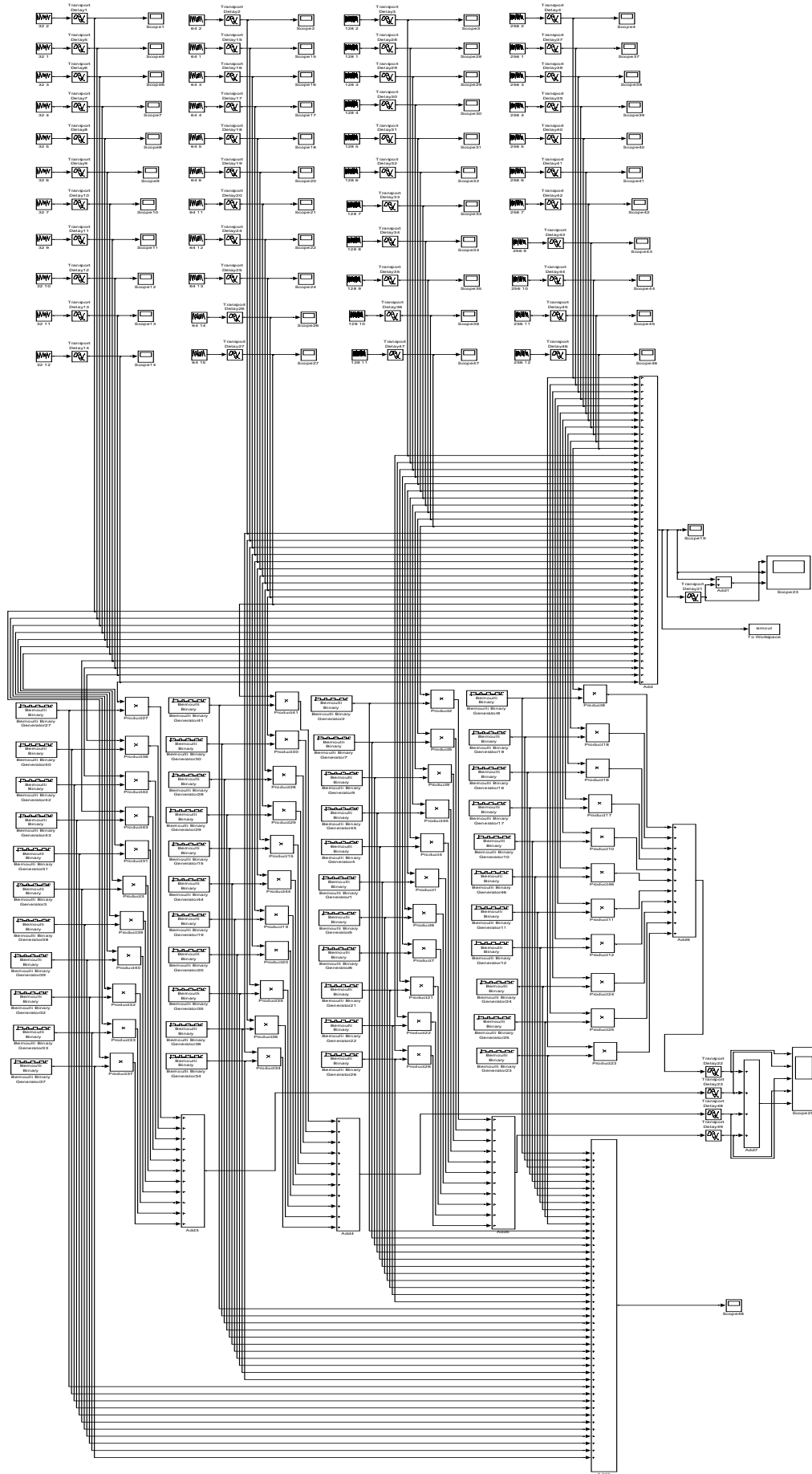


Рис. 3. Схема моделювання самоподібного трафіку

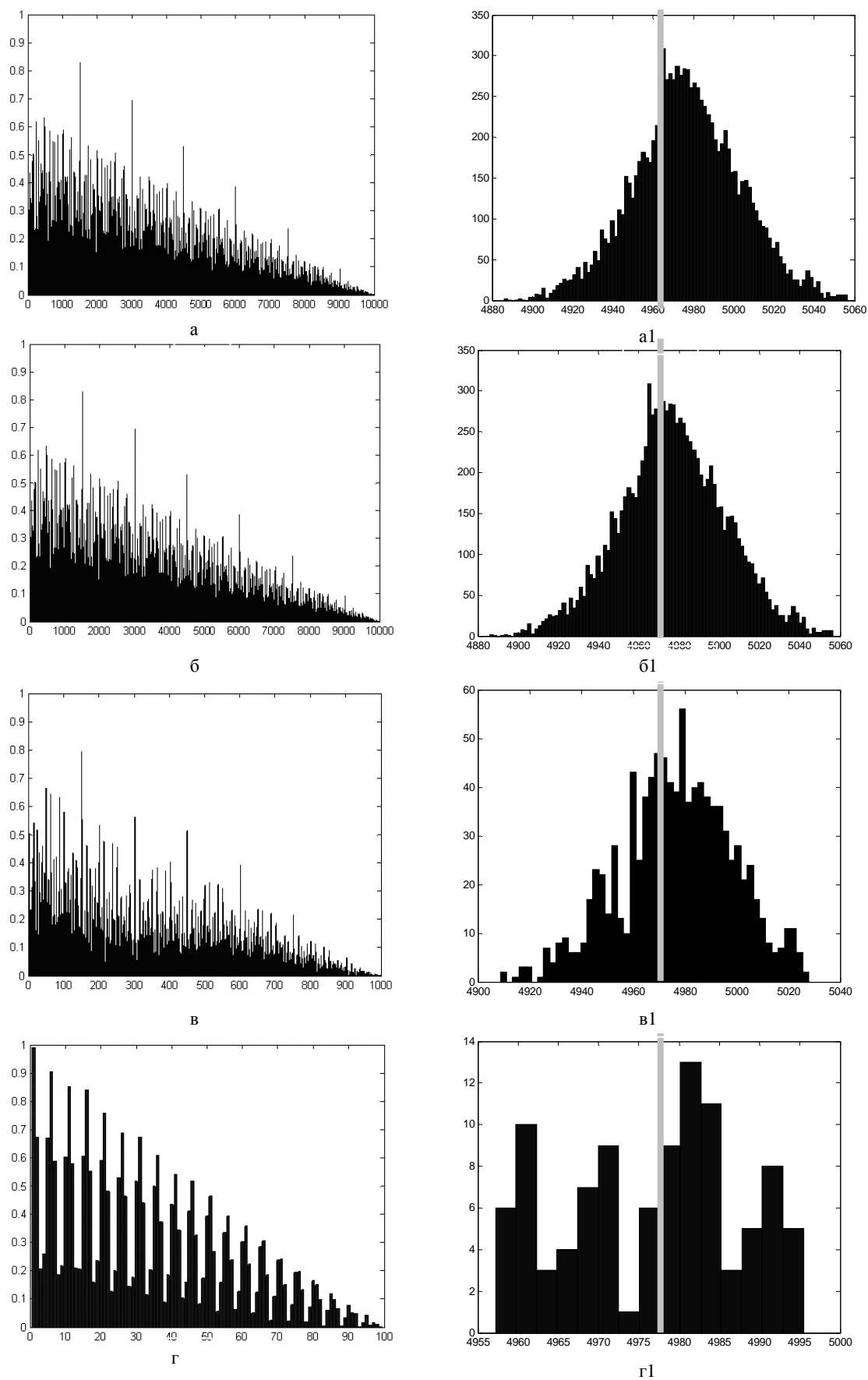


Рис. 4. Графіки АКФ (а – в) та гістограм (а1 – в1) змодельованих та агрегованих процесів зі значеннями блоків  $m$  агрегування:

а, а1 –  $m = 1$ ; б, б1 –  $m = 10$ ; в, в1 –  $m = 100$ ; г, г1 –  $m = 1000$

Для порівняння на рис. 5 зображені гістограми та графіки АКФ реалізації трафіку протоколу TCP, аналіз якої проведений в роботі [8]

Якщо порівняти рис. 4 та 5, візуально можна зробити висновок про схожість у щільностях розподілу (не експоненціальний закон, а наявність хвостів) та у поведінці АКФ, яка характеризується залежністю, що убиває повільно.

Завдяки цьому обґрунтовується ствердження про самоподібність змодельованого трафіку на основі ансамблю квазіперіодичних джерел, а також що саме наявність періодичної складової, обумовлене зміною швидкості потоку в залежності від часу в процесі управління навантаженням в протоколі TCP, є однією з причин формування самоподібного трафіку.

Для того, щоб перевірити гіпотезу про присутність залежності що убиває повільно (ЗУП) в отриманому часовому ряді, необхідно провести регресивний аналіз, тобто обчислити по експериментальній АКФ методом найменших квадратів параметри  $A_0$  в отриманій моделі (4):

$$r(k) = A_0 \cdot k^{-\beta}, \text{ при } k \rightarrow \infty, \quad (4)$$

де  $0 < \beta < 1$  і  $A_0 = \text{const}$ . Для оцінки ступеня точності необхідно знайти дисперсію  $\sigma_{\text{зуп}}^2$  різниці експериментальної АКФ і одержаної її апроксимації (3). Одночасно перевіряється гіпотеза о присутності залежності що убиває швидко (ЗУШ). Для цього аналогічно розраховуються параметри  $B_0$  і  $\rho$  моделі

$$r(k) = B_0 \cdot \rho^k, \text{ при } k \rightarrow \infty, \quad (5)$$

де  $0 < \rho < 1$  і  $B_0 = \text{const}$ . Для оцінки ступеню точності необхідно розрахувати дисперсію  $\sigma_{\text{зуш}}^2$  різниці експериментальної АКФ і одержаної апроксимації (5).

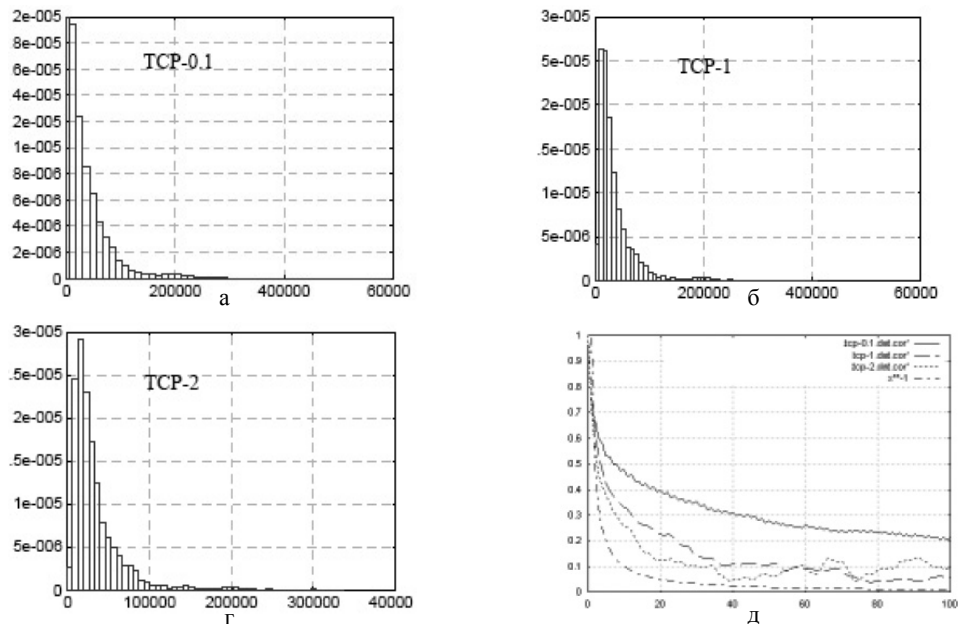


Рис. 5. Гістограми (а – в) та графіки АКФ (г) реалізації трафіку TCP з різними рівнями агрегування

Висновок про присутність ЗУП логічно зробити, якщо  $\sigma_{\text{зуп}}^2$  достатньо невелике і значення коефіцієнта

$$LR = \sigma_{\text{зуп}}^2 / \sigma_{\text{зуш}}^2 \cdot \quad (6)$$

менше 1 [9], що і підтверджується при проведенні розрахунків.

Однак, найбільш важливим для підтвердження гіпотези про само подібність АКД-моделі трафіку є значення параметру Херста. Одним з методів його оцінки є метод описаний у [11]. По log-log графіку АКФ методом найменших квадратів проводиться пряма лінія. І за формулою (7):

$$\beta = 2 - 2H, \quad (7)$$

де  $H$  – показник Херста, а  $\beta$  – параметр, обумовлений нахилом прямої на графіку (рис. 6). За розраху-

нком по графіку параметр Херста дорівнює 0,75, тобто він пролягає в межах від 0,5 до 1, що підтверджує фрактальний характер АКД-моделі.

Щільність розподілу в АКД-моделі не має чітко вираженого хвосту, а майже лінійне тривале убивання і наявність гармонік в АКФ є результатом квазіперіодичності ряду. Можливо припустити, що при синтезі отриманої моделі та ON/OFF-моделі, статистичні характеристики будуть мати більш схожий вигляд зі статистичними характеристиками реального трафіку.

**Моделювання самоподібного трафіку на основі ON/OFF джерел.** ON/OFF-модель використовується для пояснення фізичних причин самоподібних явищ в сучасних телекомунікаційних мережах. Самоподібні характеристики витікають з щільності розподілу з важким хвостом тривалості ON/OFF-станів.

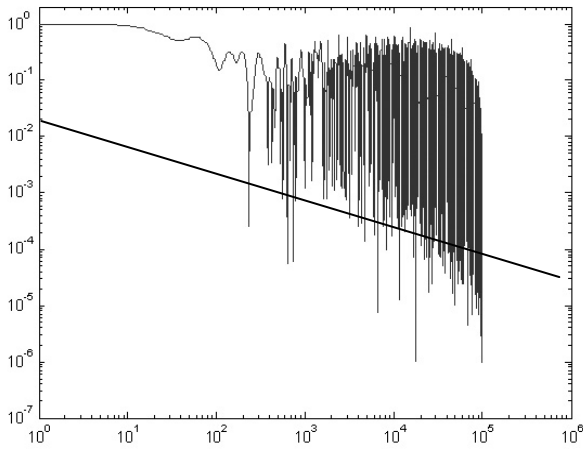


Рис. 6. Графік log-log АКФ АКД-моделі трафіка

Як зазначалося раніше, запропонована схема моделювання самоподібного трафіку включає підсхему формування ON/OFF-моделі. На рис. 7 зображені: а – реалізація, б – гістограма, та в – АКФ одного з отриманих процесів.

Вочевидь, що щільність розподілу має важкий хвіст, практично як на рис. 5. Наявність зростання від 0 до 10 обумовлене характером формування процесу в моделі (зсуви парціальних джерел) и не має принципового значення в його оцінці. АКФ має всі признаи тривалої залежності.

Результати статистичного аналізу цієї моделі приведені в наступній главі, що обумовлене необхідністю комплексного погляду на процес об'єднання ON/OFF і АКД-моделей.

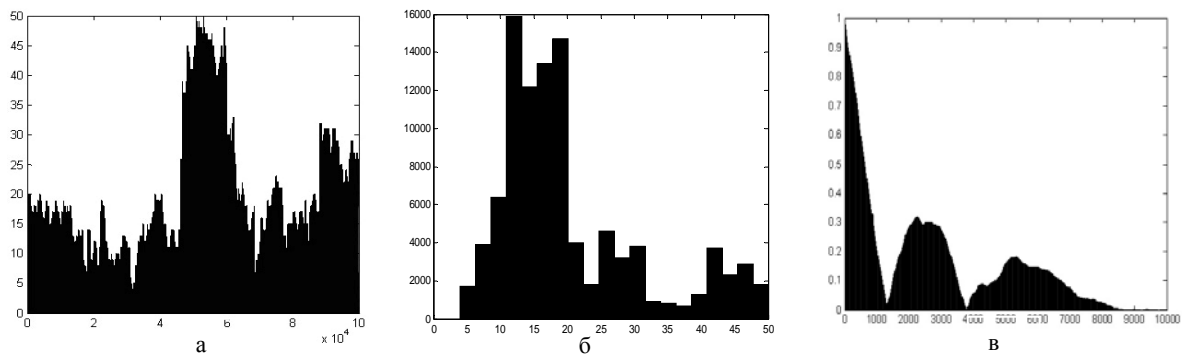


Рис. 7. а – Реалізація; б – гістограма; в – АКФ ON/OFF-моделі процесу з 152 парціальних джерел

**Моделювання самоподібного трафіка синтезом ансамблю квазіперіодичних та ON/OFF джерел.** Сьогодні вже існують методи розширення ON/OFF-моделі. Моделювання самоподібного трафіка синтезом ансамблю квазіперіодичних та ON/OFF джерел також можливо віднести саме до такого ж розширення.

Традиційна ON/OFF-модель суворо недооцінює вірогідність переповнення буферу, а відповідно і ступень втрати пакетів.

Цей недолік пропонується компенсувати за рахунок синтезу АКД і ON/OFF моделей. На рис. 8 приведені реалізації добового Інтернет-трафіку, агрегованого блоками по 5 хвилин, переведена в систему MATLAB реалізація цього трафіку, а також подібний фрагмент ON/OFF-моделі і об'єднаної з ним АКД-моделі.

На рис. 9 представлені гістограми цих реалізацій. Враховуючи масштабну інваріантність процесів можливо зробити висновок про наявність адекватної реальному трафіку щільності розподілу. Причому в об'єднаній моделі важкий хвіст більш виражений і практично повторює розподіл важкого хвосту реального трафіку.

Аналогічний висновок з урахуванням масштабної інваріантності можливо зробити і стосовно вигляду АКФ, графіки яких приведені на рис 10. Для оцінки показника Херста по формулі (7) про-

ведемо аналіз log-log графіків АКФ зазначених процесів (рис.11).

Показник Херста для реального трафіку має значення  $H = 0,75$ , для ON/OFF-моделі  $H = 0,7$  і для об'єднаної моделі  $H = 0,8$ . На підставі цього можливо зробити висновок про належність всіх приведених реалізацій до самоподібних процесів. Причому характер трафіку об'єднаного процесу більш відповідає реальному, що підтверджується і значенням показника Херста.

## Висновки

В результаті моделювання процесу злиття незалежних пульсуючих інформаційних потоків або АКД-моделі встановлено, що результируючий трафік має фрактальні (самоподібні) властивості з більш вираженою автокореляційною залежністю, але з менш вираженою щільністю розподілу з точки зору вагомості хвоста.

Сформована ON/OFF-модель також має подібні властивості, але з чітко вираженою тяжкістю хвоста щільності розподілу.

Проведена оцінка кореляційної функції і показника Херста, синтезованого на основі двох моделей процесу, також підтвердили гіпотезу про фрактальну природу трафіку, причому він в більшій мірі відповідає статистичним характеристикам реального трафіку.

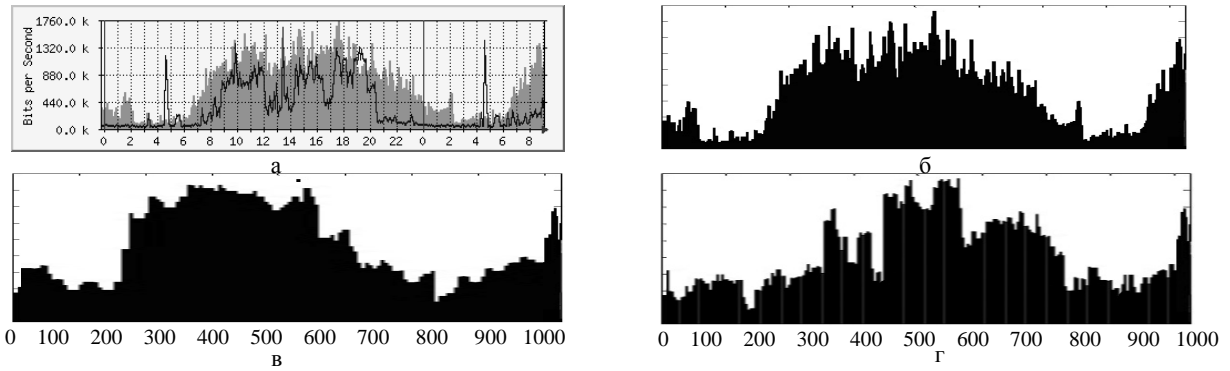


Рис. 8. а – добова реалізація Інтернет-трафіку; б – реалізація Інтернет-трафіку в середовищі MATLAB; в – ON/OFF-модель трафіку, реалізована в середовищі MATLAB; г – модель трафіку, реалізована в середовищі MATLAB синтезом ON/OFF-моделі та моделі побудованої ансамблем квазіперіодичних джерел

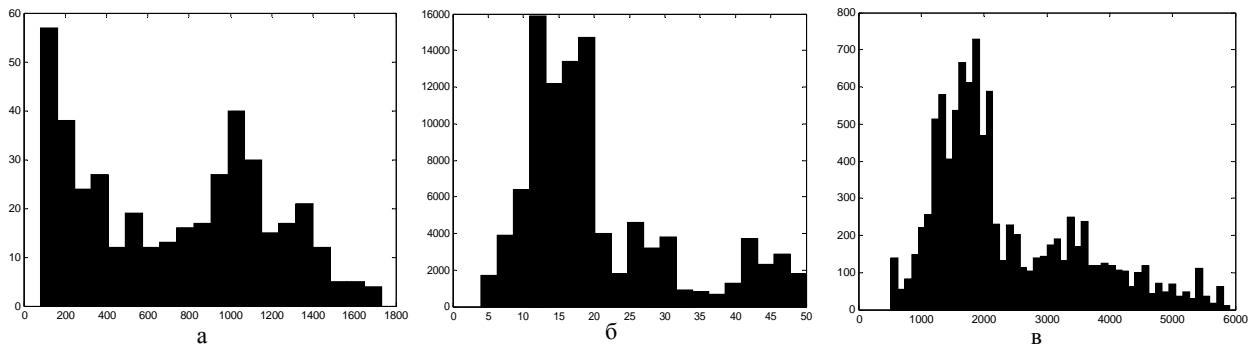


Рис. 9. а – гістограма реалізації Інтернет-трафіку; б – гістограма ON/OFF-моделі трафіку; в – гістограма моделі реалізованої синтезом ON/OFF-моделі та моделі, побудованої ансамблем квазіперіодичних джерел

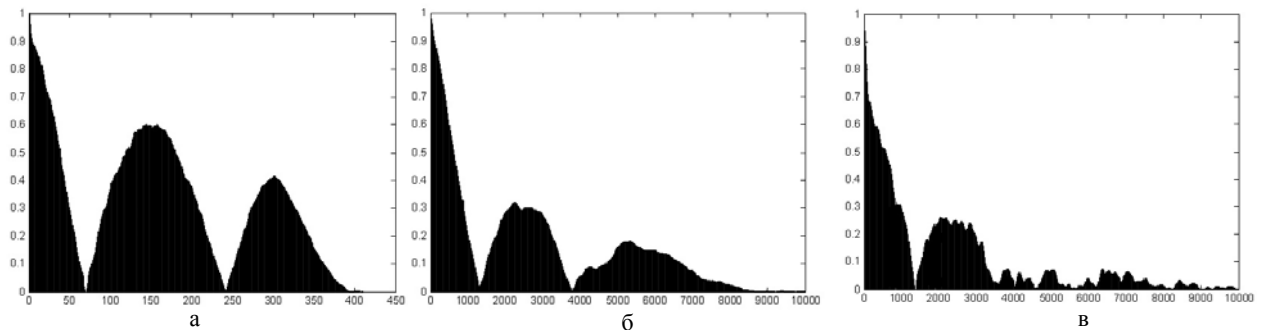


Рис. 10. а – АКФ реалізації Інтернет-трафіку; б – АКФ ON/OFF-моделі трафіку; в – АКФ моделі, реалізованої синтезом ON/OFF-моделі та моделі, побудованої ансамблем квазіперіодичних джерел

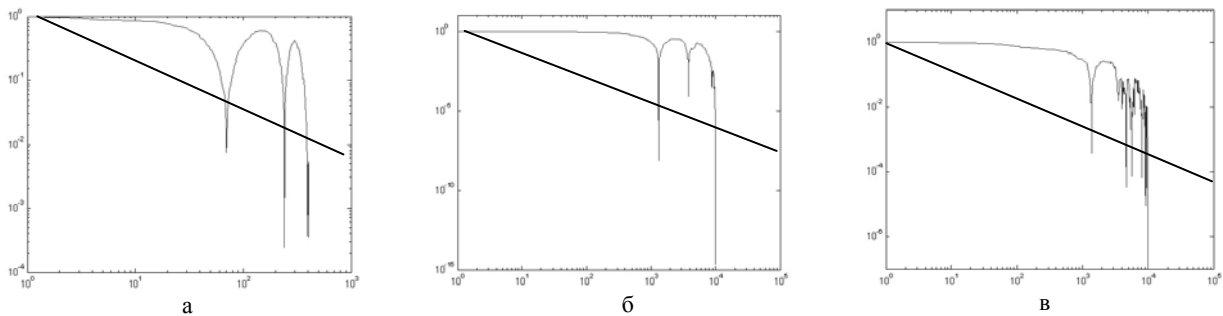


Рис. 11. а – log-log АКФ реалізації Інтернет-трафіку; б – log-log АКФ ON/OFF-моделі трафіку; в – log-log АКФ моделі реалізованої синтезом ON/OFF-моделі та моделі побудованої ансамблем квазіперіодичних джерел



Статистичні характеристики зазначених процесів дають можливість припущення щодо прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах. Відмінною особливістю є припущення про більш тривале прогнозування на основі складової ON/OFF-моделі, а локальне на складової АКД-моделі синтезованої їх об'єднанням моделі.

Результати моделювання достатньо повно узгоджуються із результатами аналогічних числових і експериментальних досліджень.

#### Подальші напрямки роботи.

1. Відомо, що в частотній області залежність, що убиває повільно, характеризується ступеневим законом поведінки спектральної щільності процесу, що розглядається. Тому одним з подальших кроків є проведення аналізу енергетичного спектру цього процесу.

2. З метою підтвердження фрактальної природи моделі за допомогою показника Херста заплановане проведення його оцінки за іншими методами: дисперсійного аналізу та R/S-статистики.

3. За підсумками аналізу результатів експериментальних даних передбачена розробка методу прогнозування навантаження.

#### Список літератури

1. Донсков Ю.Е., Ботнев А.К. Системы связи и передачи данных армии США: состояние и перспективы развития // Военная мысль. – 2005. – № 7. – С. 4-47.
2. Семеріч Ю.П. Забезпечення зв'язку у миротворчих операціях // Наука і оборона. – 2004. – № 1. – С. 33-37.
3. Leland W., Taqqu M., Willinger W. On the self-similar nature of IP-traffic // IEEE/ACM Transaction on Networking. – 1997. – № 3. – P. 423-431.

4. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Монография / Р.Э. Пащенко, Г.А. Кучук, А.А. Можжаев и др. – Х.: ЭкоПерспектива, 2006. – 360 с.

5. Кучук Г.А., Можжаев О.О., Воробйов О.В. Анализ та моделі самоподібного трафіка // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – Вып. 9 (35). – С. 173-180.

6. Цыбаков Б.С. Модель телеграфика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. – 1999. – № 5. – С. 24-31.

7. Кучук Г.А., Можжаев О.О., Воробйов О.В. Метод агрегування фрактального трафіка // Радиоелектронні та комп'ютерні системи. – 2006. – № 6 (18). – С. 181-188.

8. Erramilli A., Narayan O., Willinger W. Experimental queuing analysis with long-range dependent packet traffic // IEEE/ACM Transaction on Networking. – 1996. – № 4. – P. 209-223.

9. Кучук Г.А. Учет фрактальных свойств пульсирующего трафика // Тез. докл. НТК "Инфотелекоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании". – Ставрополь: МОН РФ, СевКГТУ, 2004. – С.286-291.

10. Кочура В.О., Кучук Г.А., Можжаев О.О. Моделювання динамічних процесів у віртуальних з'єднаннях // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ ЗС, 2006. – Вип. 2 (4). – С. 217-224.

11. P. Håga, P. Pollner, G. Simon, I. Csabai, G. Vattay. Self-generated Self-similar Traffic // Nonlinear phenomena in complex systems: an Interdisciplinary Journal. – 2003. – Vol.6, No.4. – P. 814-823.

Надійшла до редколегії 16.08.2009

**Рецензент:** д-р фіз.-мат. наук, проф. С.В. Смеляков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, Харків.