

## САМОПОДІБНА МОДЕЛЬ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ ХМАРКОВИХ СХОВИЩ ДАНИХ

© Струбицький Р. П., 2015

Наведено результати практичного дослідження завантаженості реального хмарного сховища даних. На основі дослідження встановлено динамічні характеристики вхідного і вихідного трафіку, а також розподіл апаратних потужностей сервера, що дало змогу побудувати динамічну модель завантаженості та практично довести доцільність використання для цього фрактальних моделей. Практично виявлено параметри часової самоподібності. Реалізована самоподібна модель завантаженості дозволяє з високою точністю прогнозувати завантаженість у часовому розрізі.

**Ключові слова:** хмаркові сховища даних, самоподібність, моделювання.

This article presents the results of the practical study of real load cloud storage. The dynamic characteristics of incoming and outgoing traffic and distribution capacity server hardware are established. It has enabled a dynamic model load construction and the opportunity to practically demonstrate the feasibility of using fractal models. Temporal self-similarity parameters have been revealed. Implemented self-similar model of load allows accurately predict the workload in the time context.

**Key words:** cloud data storage, self-similarity, modelling, fractal models, workload.

### Вступ. Загальна постановка проблеми

Під час збору, опрацювання та зберігання інформації неминуче виникає необхідність в обміні даними між учасниками цього процесу. З кінця 70-х років минулого століття почався бурхливий розвиток комп'ютерних мереж і відповідного мережевого обладнання. Локальні та глобальні мережі продовжують розвиватися, виникають нові протоколи передавання даних, розширюються апаратні можливості мережевого обладнання, зростає кількість під'єднаних абонентів мереж та сумарний об'єм трафіку.

За останні роки почала широко використовуватися технологія хмаркових обчислень та відповідні сховища даних, як частина цієї технології. Архітектура внутрішньої структури сучасних хмаркових сховищ даних не дозволяє максимально використовувати їх потенційні функціональні можливості. Одна з причин цього – складність поведінки мережевого трафіку, і в середині хмарки, і назовні, що впливає на якість обслуговування абонентів цих сховищ.

З погляду сучасних тенденцій розвитку систем телекомунікації, і не лише хмаркових сховищ даних, як частини цього напрямку, актуальною задачею є побудова конвергентної багатосервісної мережі. Така мережа повинна забезпечувати необмежений набір послуг, надавати гнучкі можливості для управління і створення нових видів сервісів. Останнє вимагає реалізації універсальної транспортної мережі з розподіленою комутацією, де взаємодія між пристроями і додатками здійснюється за допомогою створення віртуальних з'єднань, на управління якими помітно впливають особливості стохастичної динаміки процесів пакетної комутації.

З іншого боку, інтенсивний розвиток галузі комп'ютерної телекомунікації спричиняє низку проблем. Одна з них полягає в тому, що при зростаючій кількості споживачів інформаційних послуг зростають вимоги до мережевого та серверного обладнання, яке необхідне для підтримування належного рівня якості обслуговування.

## Актуальність теми

Ефективний розвиток мережевого обладнання і транспортних протоколів повинен базуватися на адекватних математичних моделях параметрів трафіку та інструментах моделювання мережевих процесів [11, 12]. Характер мережевого трафіку визначається низкою факторів – від поведінки користувачів, або прикладного програмного забезпечення, до протоколів передавання та використовуюваного обладнання. Очевидно, що макропараметри мережевого трафіку на порівняно великих часових інтервалах визначаються суб'єктивно. Проте, характер трафіку на інтервалах порядку мікросекунд визначається, переважно, транспортними протоколами, мережевим обладнанням і серверним програмним забезпеченням. Отже, дослідження основних характеристик сервера хмаркового сховища даних, таких як виділення оперативної пам'яті, завантаження центрального процесора, стан процесів операційної системи на фоні інтенсивного мережевого трафіку, є актуальною задачею.

Однією з найактуальніших проблем дослідження ймовірно-часових характеристик хмаркових сховищ даних є адекватне врахування особливостей мережного трафіку. Метою роботи є розгляд різних моделей завантаженості сервера хмаркового сховища даних, як функції від мережевого трафіку та аналіз найперспективнішої моделі для цієї завантаженості хмаркових сховищ даних, яка враховує властивості самоподібності трафіку як часового ряду. На прикладі реального хмаркового сховища даних розраховані динамічні характеристики вхідного та вихідного трафіку, а також розподіл апаратних потужностей хмаркового сервера. Ці параметри дозволяють розрахувати завантаженість сервера. Для всіх процесів було встановлено самоподібність, що підтверджує можливість застосування фрактальних моделей для роботи з хмарковими сховищами даних, зокрема, для прогнозування завантаженості серверів хмаркових сховищ.

## Мета і постановка задачі

До недавнього часу теоретичну базу для проектування систем розподілу інформації забезпечувала теорія телетрафіку, яка є однією з гілок теорії масового обслуговування.

Ця теорія добре описує процеси, що відбуваються в таких системах розподілу інформації, як телефонні мережі, побудованих за принципом комутації каналів. Найпоширенішою моделлю потоку викликів (даних) у теорії телетрафіку є найпростіший потік (стаціонарний ординарний потік без післядії), який також називають стаціонарним пуассонівським потоком.

Класичні підходи теорії віддаленого трафіку ґрунтуються на припущенні, що вхідні потоки є стаціонарними потоками Пуассонівського типу, тобто являють собою суперпозицію великої кількості незалежних стаціонарних ординарних потоків без післядії рівномірно малої інтенсивності. Для телефонних мереж з каналною комутацією таке припущення є справедливим. Проте дослідження показують, що трафік телекомунікаційних мереж сучасних хмаркових сховищ даних з комутацією пакетів має особливу структуру, яка не дозволяє використовувати під час їх проектування звичні методи, які ґрунтуються на марківських моделях і формулах Ерланга. Йдеться про прояв ефекту самоподібності віддаленого трафіку, тобто в реалізації завжди присутні доволі сильні викиди на фоні відносно низького середнього рівня. Це явище значно погіршує характеристики мережі (збільшення втрат, затримки, джитер) при проходженні самоподібного трафіку через мережу. Сучасний стан бурхливого розвитку високих технологій привів до появи і повсюдного поширення мереж з пакетним передаванням даних, які поступово почали витіснити системи з комутацією каналів, але, як і раніше, їх проектували на основі загальних положень теорії телетрафіку. Отже, утворилася «проблема самоподібності телетрафіку», якій за останні роки присвячено понад тисячу робіт і яка досі не втратила своєї актуальності.

Незважаючи на значну популярність цієї тематики і тривалий період її активного вивчення, доводиться констатувати, що до цих пір залишається багато запитань і невиконаних завдань.

Основні з них:

- фактично відсутня теоретична база, яка прийшла би на зміну класичній теорії масового обслуговування під час проектування сучасних систем розподілу інформації з самоподібним трафіком; нема єдиної загальноновизнаної моделі самоподібного трафіку;

- не існує достовірної та визнаної методики розрахунку коефіцієнта для заданого потоку, що відповідає відношенню пікової інтенсивності процесу надходження заявок обслуговування до його середнього значення;
- не існує достовірної та визнаної методики розрахунку параметрів та показників якості систем розподілу інформації за умови впливу ефекту самоподібності;
- відсутні алгоритми і механізми, які забезпечують якість обслуговування в умовах самоподібного трафіку.

Метою роботи є визначення характеристик фрактальних процесів завантаженості хмаркового сховища даних при різних потоках вхідних та вихідних даних для подальшого прийняття рішення про способи управління сервером та оптимізації його завантаженості.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- дослідити трафіки даних на сервері хмаркового сховища;
- проаналізувати об'єднані потоки даних сховища;
- зробити висновок про залежність рівня завантаженості від фрактальності сумарного потоку і від самоподібних властивостей окремих потоків, які він містить.

### **Огляд моделей мережевого трафіку в хмарці**

Стохастичні моделі трафіку, які класично широко використовувалися раніше [7], в основному представляли марківські процеси, тобто враховували короткотермінові залежності в характеристиках. Такі моделі описувалися розподілом Пуассона з змінною довжиною повідомлення за експоненціальним законом, і ґрунтуються на теорії масового обслуговування. Ці моделі сформувалися в період зародження комп'ютерних мереж типу ARPANET. Результати моделювання трафіку на основі теорії масового обслуговування відповідали розподілу часу опрацювання викликів у телефонних мережах.

Проте, пізніше стали все частіше з'являтися роботи, в яких вказувалося на зростання тенденції міжмережевого обміну даними і об'ємів сумарного трафіку. Також на характер трафіку стали впливати нові протоколи передавання даних у мережі, особливо у внутрішньому середовищі хмарних сховищ даних. На основі подібних досліджень у 1986 р. була розроблена концепція «ланцюжка пакетів» (packettrain). В основі цієї моделі прийнято, що пакети в мережі передаються разом, в той же час як в пуассонівських моделях кожен пакет опрацьовувався окремо [10].

Зовсім недавно також стала популярною модель, в якій об'єм трафіку враховує довготермінові залежності характеристик. Також було встановлено, що трафік у сучасних мережах сховищ даних має властивості самоподібності і характеризується розподілом з важким хвостом [9].

У класичній моделі трафіку вважається, що джерела даних працюють почергово [2]. Тобто періоди високої активності змінюються тривалими затримками. На основі цього було встановлено, що час надходження повідомлення і довжина повідомлень мають експоненціальний розподіл, а процес надходження повідомлень від джерел даних – процес з пуассонівським розподілом. Усі процеси, при цьому, стаціонарні й незалежні.

Пуассонівська модель не враховує, що реальний мережевий трафік має періоди сильних сплесків активності. Для класичної моделі автокореляційна функція прямує до нуля для великих відліків часу, тоді як наявність сплесків активності в реальному досліджуваному трафіку приводить до додатної автокореляції.

Модель трафіку як ланцюжка повідомлень була сформульована і стала популярною в 80-ті роки ХХ ст. [5]. У межах моделі вважається, що пакети трафіку передаються разом і можуть опрацьовуватися як єдине ціле. Мережеве обладнання в кожній точці мережі може приймати рішення про подальшу обробку ланцюжка за першим повідомленням. Подібний алгоритм оберігав би мережу від нефункціональних операцій для аналізу кадрів. Проте, варто зауважити, що це модель джерел повідомлень. Модель може бути застосована тільки для повідомлень, які мають один пункт призначення, тобто її не можливо застосувати для мереж. Очевидно, що реалізації транспортних протоколів і мережевого обладнання для моделі ланцюжка повідомлень і класичної моделі будуть кардинально відрізнятися.

У багатьох сучасних роботах відзначається [6, 9], що об'єднання трафіку від декількох змінних джерел приводить до того, що трафік стає сильно автокорельованим з довготерміною залежністю [8]. Це приводить до того, що усталеність кореляційних структур не зникає навіть для великих значень лагу. Інакше кажучи, сукупність множини джерел даних, які проявляють синдром нескінченної дисперсії, в результаті дають самоподібний об'єднаний мережевий трафік, який наближається до фрактального броунівського руху. Крім того, дослідження різних джерел трафіку показують, що велика зміна поведінки – це властивість, яка властива для архітектур типу клієнт/сервер.

Проблемами самоподібності мережевого трафіку займаються багато дослідних груп. Зокрема, в роботі [15] досліджено властивості реального трафіку в мережах з пакетною комутацією. З використанням методу R/S аналізу показано самоподібну природу мережевого трафіку в інформаційних комп'ютерних мережах. На основі такого підходу була розроблена модель генератора трафіку, який реалізовує мультифрактальну поведінку потоків даних у реальних інформаційних системах, що дозволяє імітувати трафік з заданими показниками самоподібності. У роботі [16] показано, що в мережах стандарту 802.16b самоподібні властивості трафіку проявляються і на каналному, і на транспортному рівнях. Отримані значення основних показників ступеня фрактальності мережевого трафіку та запропоновано методи агрегування вихідної статистики [14].

Робота [6] присвячена експерименту зі зняття трафіку мережі одного з великих Інтернет-провайдерів, а також наводяться результати аналізу структурних особливостей цього трафіку. Автори довели, що самоподібні властивості проявляються і на каналному, і на транспортному рівнях. У роботі [1] американські вчені вивчали процеси з довготривалою залежністю. Для генерації таких процесів автори пропонують використання фрактальної моделі інтегрованого змінного середнього.

Самоподібність – це властивість об'єкта, частини якого подібні до всього об'єкта загалом. Багато об'єктів у природі мають такі властивості, наприклад, узбережжя, хмари, кровоносна система людини чи тварин.

Неформально самоподібний (фрактальний) процес можна визначити як випадковий процес, статистичні характеристики якого проявляють властивість масштабування. Самоподібний процес істотно не змінює свого виду при розгляді в різних масштабах шкали часу. Зокрема, на відміну від процесів, які не мають фрактальних властивостей, не відбувається швидкого «згладжування» процесу при усередненні за шкалою часу – процес зберігає схильність до сплесків.

Нехай  $\{X_k; k = 0, 1, 2, \dots\}$  – стаціонарний випадковий процес. Враховуючи стаціонарність і припущення про існування і скінченність двох перших моментів, введемо позначення:

$m = E[X_t]$  – середнє значення, або математичне очікування;

$\sigma^2 = E[X_t - m]^2$  – дисперсія;

$R(k) = E[(X_{t+k} - m)(X_t - m)]_\infty$  – кореляційна функція,

$r(k) = \frac{R(k)}{R(0)} = \frac{R(k)}{\sigma^2}$  – коефіцієнт кореляції. Під усередненням за часовою шкалою будемо

розуміти перехід до процесу  $\{X^m\}$ , такому, що

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=k-m+1}^{k_m} X_i.$$

Під час моделювання мережевого трафіку значення  $X_k$  інтерпретуються як кількість пакетів (рідше – як сумарний об'єм даних у байтах), які надійшли в канал або мережу протягом  $k$ -го інтервалу часу. Вихідний процес при цьому вже є усередненим. У деяких випадках, коли є необхідність уникнути такого початкового усереднення, розглядається точковий процес, або потік подій, тобто послідовність моментів надходження одиничних пакетів у мережу.

Не існує єдиного причинного фактора, що спричиняє самоподібність. Різні кореляції, які існують у самоподібному мережевому трафіку, що впливають на різних часових масштабах, можуть виникати через різні причини, проявляючись у характеристиках на конкретних часових масштабах.

Причиною довгострокової залежності в мережевому трафіку можуть бути такі фактори:

- поведінка користувача і прикладного програмного забезпечення;
- генерація, структура і пошук даних;
- об'єднання трафіку;
- засоби адміністрування мережі;
- механізми оптимізації, які ґрунтуються на зворотних зв'язках;
- ускладнення структури мережі, збільшення кількості абонентів.

При розгляді самоподібності часто використовують чисельний параметр, який визначає міру самоподібності.

Процес називається самоподібним з параметром  $H = 1 - \left(\frac{\beta}{2}\right)$ , якщо його коефіцієнт автокореляції

$$r(k) = \frac{1}{2} \left[ (k+1)^{2-\beta} - 2k^{2-\beta} + (k-1)^{2-\beta} \right] = g(k), \quad k \in N, \quad (1)$$

де функція виражена через центральний різницевої оператор 2-го порядку  $\delta^2(f(x))$ , який діє на функцію  $f(x) = x^{2-\beta}$  так, що  $\delta(f(x)) = f\left(x + \frac{1}{2}\right) - f\left(x - \frac{1}{2}\right)$ .

Самоподібність проявляється в тому, що для процесу, який задовольняє першу умову, виконується рівність  $r_m(k) = r(k)$ , тобто в такому процесі не змінюється коефіцієнт автокореляції після усереднення за блоками будь-якої довжини  $m$ . Отже, для самоподібного процесу статистичні характеристики другого порядку нормованого агрегованого процесу  $X(m)$  не відрізняється від характеристик вихідного процесу  $X$  при значному інтервалі змін  $m$ .

Параметр  $H$  є індикатором міри самоподібності процесу, а також свідчить про наявність у нього таких властивостей, як персистентність / антиперсистентність і тривала пам'ять [4]. Параметр  $H$  може приймати значення від 0 до 1. Для білого шуму, яким є марківський процес, параметр Херста 0,5, що означає повну відсутність довгострокової або короткострокової залежності і процес є повністю випадковим, відповідно, найпростіший Пуассонівський потік ще називають «потокотом чистої випадковості першого роду».

У випадку  $H \in [0,5;1]$  процес є персистентним, має довгострокову залежність [3]: якщо протягом якогось часу в минулому спостерігалось збільшення параметрів процесу, то і в майбутньому в середньому буде відбуватися їхнє зростання. Інакше кажучи, ймовірність того, що на кроці  $k+1$  процес відхилиться від середнього в тому ж напрямку, що і на  $k$  кроці, настільки велика, наскільки параметр Херста  $H$  близький до 1.

При  $H \in [0,5;1]$  процесу властива антиперсистентність, він має короткострокову залежність [4]: високі значення процесу йдуть за низькими і навпаки. Тобто, ймовірність того, що на кроці  $k+1$  процес відхилиться від середнього в протилежному напрямку (щодо відхилення на  $k$  кроці), настільки велика, наскільки параметр Херста  $H$  близький до 0.

Довгострокова залежність є причиною різко виражених пульсацій процесу, проте дозволяє говорити про деяку передбачуваність в невеликих межах часу. З погляду теорії черг, важливим наслідком корельованості потоку є неприйнятність оцінок параметрів черг, які ґрунтуються на передбаченні про однаковий і незалежний розподіл інтервалів у вхідному потоці.

### Практичне дослідження завантаженості сховища даних

Для підтвердження існування властивості самоподібності для різних потоків даних мультисервісної мережі, а отже, й завантаженості сервера хмаркового сховища, необхідно виміряти деякі характеристики різних видів мережевого трафіку на ньому. Для цього необхідні статистичні дані про потоки і трафіки даних, а також потрібно дослідити об'єднаний потік та змінні характеристики сервера хмаркового сховища даних.

Для дослідження було використано реально діючий сервер хмаркового сховища даних. Для роботи фізичний сервер поділений на декілька віртуальних зон з використанням операційної системи Solaris, кожна з яких використовується для виконання низки завдань. Більша частина трафіку на сервері передається за протоколами HTTP/HTTPS, FTP/FTPS та SFTP.

Для віддаленого моніторингу параметрів сховища даних у реальному часі використовується додаток Zabbix [13]. Zabbix – це додаток типу клієнт-сервер, який використовується для збору, зберігання та опрацювання інформації про стан мережі, мережеві навантаження, а також стан операційної системи сервера сховища даних у реальному часі.

Для подальшої обробки були використані такі параметри сховища даних:

- вхідний/вихідний трафік;
- кількість запущених процесів;
- завантаженість і простій процесорів;
- середнє навантаження на процесор;
- об'єм кеш-пам'яті.

Отримані дані консолідувалися протягом тижня, тому можна вважати, що вони надають реальну картину використання хмаркового сховища. Часова залежність об'єму трафіку наведена на рис. 1 для вхідного і рис. 2 – для вихідного.

Оскільки аналізували дані, зібрані протягом тижня, графіки чітко демонструють певну добову періодичність.

Рис. 3, 4 відображають міру завантаження процесорів та їх перемикання.

Завантаженість процесорів системою і користувачами наведена на рис. 5, 6.

Аналогічно до даних графіку залежності вхідного і вихідного трафіку (рис. 1, 2), інші залежності повторюють динаміку перших. Це пов'язано з тим, що основна функція хмаркового сховища даних – це ввід, зберігання та вивід даних користувачів. Тобто, основне навантаження на сервери сховищ даних становлять вхідний та вихідний трафіки. Тому під час аналізу та моделювання хмаркових сховищ можна обмежитися тільки моделями трафіку, або моделлю завантаженості процесора.

Графічне представлення коефіцієнта автокореляції дозволяє візуально переконатися в тому, що досліджуваний трафік має довготермінову залежність.

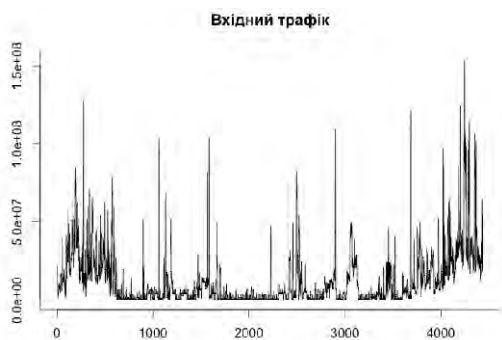


Рис. 1. Часові залежності вхідного трафіку

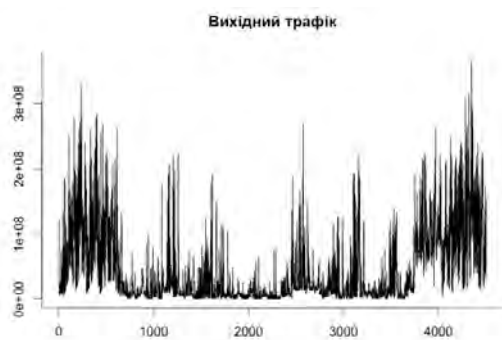


Рис. 2. Часові залежності вихідного трафіку

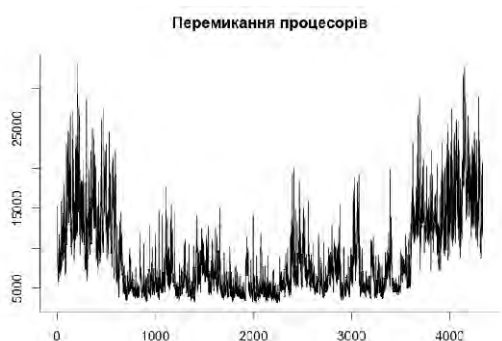


Рис. 3. Часові залежності перемикання процесорів

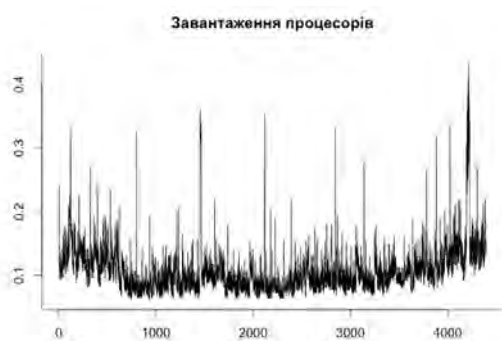


Рис. 4. Часові залежності завантаження процесорів

На рис. 7 наведено графік коефіцієнта кореляції для процесу, який відповідає вхідному трафіку в логарифмічному масштабі. Очевидно, що точки на рисунку загалом групуються навколо прямої, кутовий коефіцієнт якої може бути визначений за допомогою лінійної регресії.

Якщо процес є самоподібний, то у відповідності до ((1)) кутовий коефіцієнт  $\beta = 2(H - 1)$ . При отриманому значенні  $\beta = -0,2125$  параметр Херста виявився 0.8937.

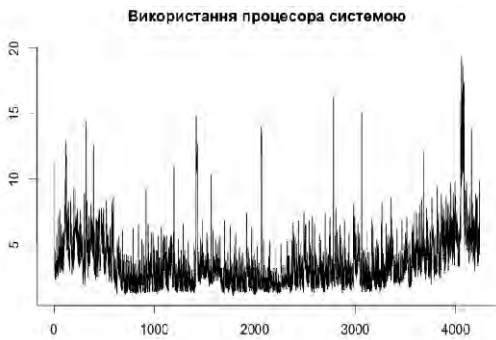


Рис. 5. Часові залежності використання процесорів системою

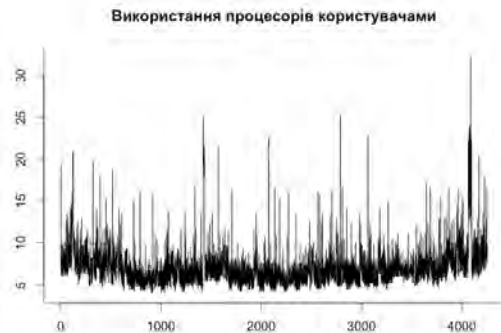


Рис. 6. Часові залежності використання процесорів користувачами

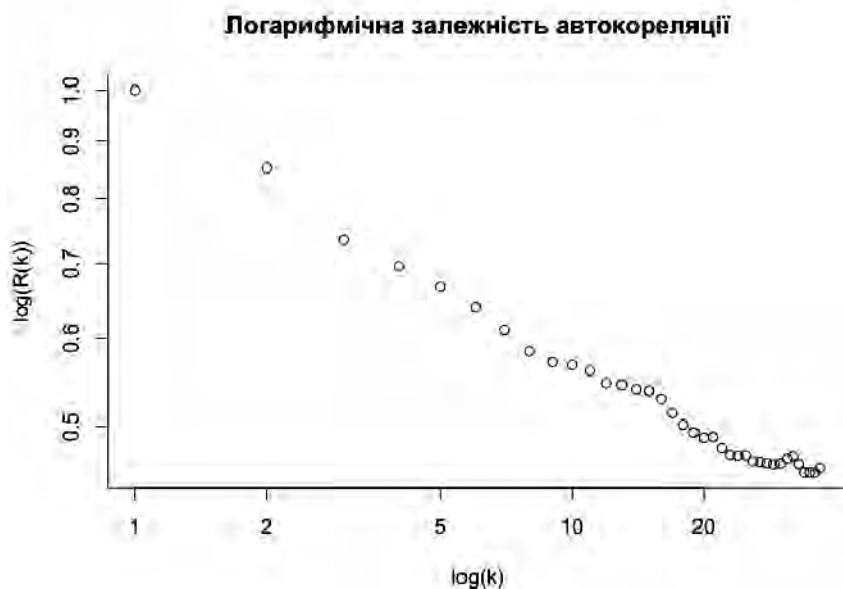


Рис. 7. Логарифмічна залежність коефіцієнта автокореляції вхідного трафіку

Для вихідного трафіку графік коефіцієнта кореляції – рис. 8. Так само як і для вхідного трафіку точки загалом групуються навколо прямої, кутовий коефіцієнт якої може бути визначений шляхом лінійної регресії. Для самоподібного процесу – кутовий коефіцієнт  $\beta = -0,1986$ , параметр Херста виявився 0.9007.

Традиційно самоподібність у будь-якому стохастичному процесі виявляється через визначення параметра Херста  $H$ . Той факт, що  $0,5 < H < 1$ , тобто значення параметра Херста відмінне від 0.5, вважається достатньою основою для визнання процесу самоподібним. Варто зауважити, що значення параметра  $H$ , яке наближається до одиниці, може означати, що процес є детермінованим, тобто не випадковим: для ряду строго детермінованих процесів структура строго повторяється на будь-якому масштабі, що приводить до одиничного значення параметра Херста.

При розгляді часової залежності трафіку було відзначено присутність періодичної складової в ньому, що й приводить до такого великого значення параметра Херста. Звичайно, наближеність параметра Херста до одиниці дозволяє точніше виконувати прогнозування.

### Логарифмічна залежність автокореляції

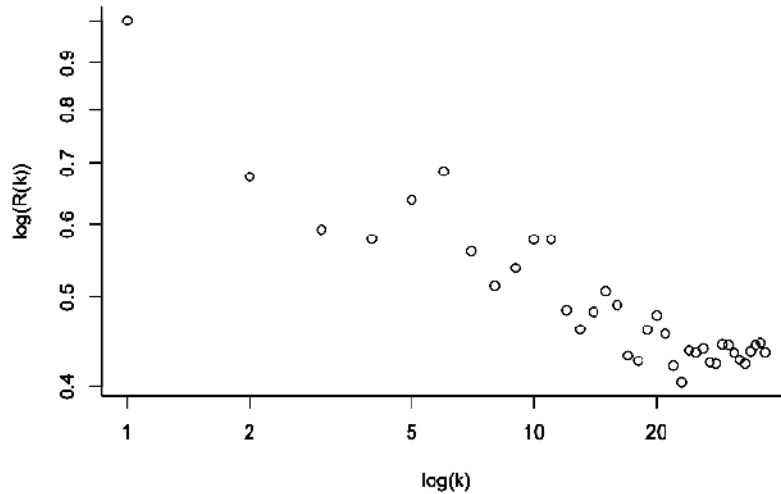


Рис. 8. Логарифмічна залежність коефіцієнта автокореляції вихідного трафіку

### Логарифмічна залежність автокореляції

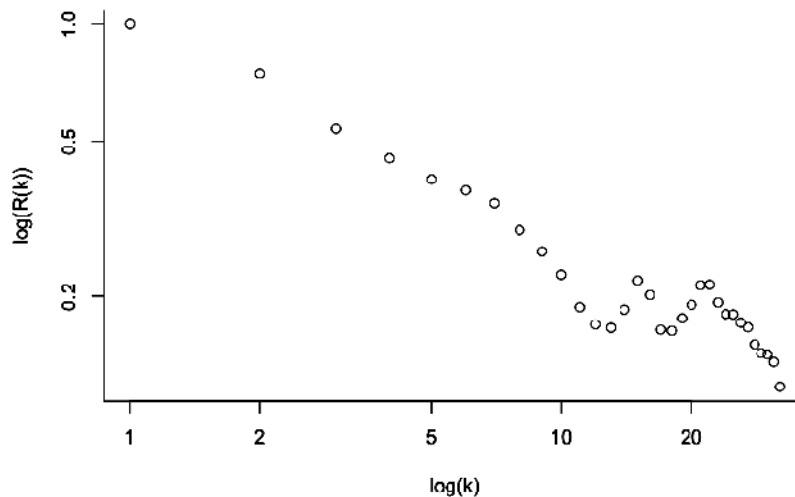


Рис. 9. Логарифмічна залежність коефіцієнта автокореляції для одноденного трафіку

Для того, щоб дослідити трафік детальніше, потрібно розглянути окремо часові залежності в межах одного дня. Виключення періодичної добової складової з трафіку та окремий аналіз його в межах одного дня (рис. 9) показує на дещо менше значення параметра Херста, воно коливається в межах 0.70 – 0.87.

### Висновки та перспективи подальших наукових розвідок

У результаті проведеного дослідження було встановлено періодичність трафіку хмаркового сховища даних, що має добовий характер. Інтенсивність завантаження сховища в основному залежить від вхідного і вихідного трафіку. Достатнє високе значення параметра Херста вказує на потенційну можливість моделювання і прогнозування завантаженості хмаркового сховища даних у довгостроковий період.

1. Harmantzia F. C., Hatzinakos D. Heavy Network Traffic Modeling and Simulation using Stable FARIMA Processes // IEEE Trans. Signal Proc. Lett. – 2000. – Vol. 5. – P. 48–50. 2. Heyman D. P., Sobel M. J. Stochastic Models in Operations Research: Stochastic optimization. Dover Books on Computer



*Science Series. – Dover Publications, 2003.*

3. Hurst H. Long term storage capacity of reservoirs // *Transaction of the American society of civil engineer.* – 1951. – Vol. 116. – P. 770–799.
4. Hurst H. E., Black R. P., Simaika Y. M. Long-term storage: an experimental study. – Constable, 1965.
5. Jain R., Routhier S. Packet Trains–Measurements and a New Model for Computer Network Traffic // *IEEE J.Sel. A. Commun.* – 2006. – sep. – Vol. 4, no. 6. – P. 986–995.
6. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version) / Will E. Leland, Murad S. Taqqu, Walter Willinger, Daniel V. Wilson // *IEEE/ACM Trans. Netw.* – 1994. – Vol. 2, no. 1. – P. 1–15.
7. Open, Closed, and Mixed Networks of Queues with Different Classes of Customers / Forest Baskett, K. Mani Chandy, Richard R. Muntz, Fernando G. Palacios // *J. ACM.* – 1975. – apr. – Vol. 22, no. 2. – P. 248–260.
8. The Pseudo-self-similar Traffic Model: Application and Validation / Rachid El Abdouni Khayari, Ramin Sadre, Boudewijn R. Haverkort, Alexander Ost // *Perform. Eval.* – 2004. – mar. – Vol. 56, no. 1–4. – P. 3–22.
9. Self-similarity Through High-variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level / Walter Willinger, Murad S. Taqqu, Robert Sherman, Daniel V. Wilson // *IEEE/ACM Trans. Netw.* – 1997. – feb. – Vol. 5, no. 1. – P. 71–86.
10. Song Cheng. Packet Train Model: Optimizing Network Data Transfer Performance : Ph. D. thesis / Cheng Song. – The University of Wisconsin – Madison, 1989. – AAI8923401.
11. Stallings W. High-speed networks and internets: performance and quality of service. William Stallings books on computer and data communications technology. – Pearson Education, 2002.
12. Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. Computer Networks. – 5th edition. – Prentice Hall, 2011.
13. Vacche A.D., Lee S. K. Mastering Zabbix. – Packt Publ., 2013.
14. Бельков Д. В. Дослідження мережевого трафіку // *Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту.* – Vol. 10(153) of *Обчислювальна техніка та автоматизація.* – Донецьк, 2009. – P. 212–215.
15. Бессараб В. І., Ігнатенко Е. Г., Черівнський В. В. Генератор самоподібного трафіку для моделей інформаційних мереж // *Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту.* – Vol. 15(130) of *Обчислювальна техніка та автоматизація.* – Донецьк, 2008. – P. 23–29.
16. Платов В. В., Петров В. В. Дослідження самоподібної структури телетрафіку бездротової // *Електротехнічні та інформаційні комплекси і системи.* – Vol. 3. – 2004. – P. 38–49.